
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Verifikace modelu VT přehříváků na základě provozních měření

The Superheater Model Verification Based on Operation Data

Diplomová práce

Autor:

Bc. Jan Čejka

Vedoucí práce:

Ing. Lukáš Hubka , Ph.D

V Liberci 18. 5. 2012

Vložit zadání DP.....!

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 18. 5. 2012

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat hlavně vedoucímu této diplomové práce Ing. Lukáši Hubkovi , Ph.D a také i dalším lidem, kteří mi s touto prací pomohli. Jejich rady a zkušenosti mi pomohly ke vzniku této práce. Zároveň také děkuji své rodině za poskytnutou trpělivost a zázemí.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo verifikovat model průtočného kotle tepelné elektrárny na základě provozních měření. V první části práce je popsán nelineární proces přehřívání páry v průtočném kotli tepelné elektrárny a jeho model. Za účelem verifikace modelu průtočného kotle tepelné elektrárny byly dopočteny potřebné veličiny pro simulaci jako neznámý dodaný tepelný příkon do jednotlivých výměníků a neměřený průtok v některých částech soustavy. Z hlediska verifikace byla kvalita modelu posuzována na základě kvadratického kritéria, vizuálního porovnání a vybraných statistických metod. Z dostupného provozního měření byly hledány možné vazby mezi vstupními veličinami a výstupní teplotou páry na základě identifikace. Na závěr byly diskutovány výsledky verifikace, možné zlepšení modelu, kvalita dostupného provozního měření a návrh ideální metodiky tvorby modelu induktivním přístupem.

Klíčová slova: verifikace, nelineární simulační model, průtočný kotel, identifikace

The aim of this work was to verify the model of once-through boiler of power plant on the base of the operation measurement. The first part of this work describes the nonlinear process of steam superheating in once-through boiler of power plants and its model. In order to verify the model of once-through boiler of power plant was determined the unknown heat input power into heat-exchangers and non-measurement flows in some important parts. The model was verify on the base of quadratic criterion, visual comparison and selected statistical methods. The operation measurement was used for the identification of heat-exchangers. Finally were discussed results of verification, possibility of improvement of the model, quality of the operation measurement and optimal identification process of heat-exchangers.

Key words: verification, nonlinear simulation model, once-through boiler, identification

Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Obsah	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	13
2 Úvod.....	14
3 Nelineární proces přehřívání páry v průtočném kotli.....	15
3.1 Základní princip tepelné elektrárny a průtočného kotle.....	15
3.2 Nelineární model vysokotlakého přehřívání páry	17
3.3 Měření reálného provozu průtočného kotle	21
4 Verifikace modelu a problematika tepelného příkonu	23
4.1 Stanovení dodaného tepelného příkonu	23
4.2 Verifikace modelu vysokotlaké části průtočného kotle	30
4.3 Verifikace v úseku A.....	32
4.4 Verifikace v úseku B.....	35
4.5 Verifikace v úseku C.....	38
4.6 Verifikace v úseku D.....	41
4.7 Verifikace v úseku E	44
4.8 Vyhodnocení verifikace	47
5 Identifikace soustavy na základě provozního měření.....	49
5.1 Metoda přímé identifikace bez přídavného signálu	50
5.2 Model ARX a IV4.....	55
5.3 Model ARMAX, BJ a OE	58
5.4 Model NARX a Hammerstein.....	61
5.5 Rekurzivní model ARX.....	63
5.6 Vyhodnocení identifikace	64
6 Závěr	66
7 Použitá literatura	68
8 Příloha	69

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Zjednodušené schéma průtočného kotle, převzato z [2]	15
Obr. 2.2: Kaskádní řízení teploty páry vysokotlaké části průtočného kotle, převzato z [2]	17
Obr. 2.3: Simulační schéma vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem s řídicím systémem	19
Obr. 2.4: Porovnání průběhu teploty páry modelu a měření za výstupním přehřívákem s ošetřením a bez ošetření počátečních podmínek	20
Obr. 2.5: Vysokotlaká část průtočného kotle za bifluxem, převzato z [2]	21
Obr. 3.1: Základní struktura zpětnovazebního zapojení určeného ke stanovení dodaného tepelného příkonu	24
Obr. 3.2: Vliv periody vzorkování T na průběh akční veličiny, resp. na průběh dodaného tepelného příkonu	25
Obr. 3.3: Porovnání teploty páry za výstupním přehřívákem pro různé nastavení PI regulátoru ve zpětné vazbě, postupné zvyšování proporcionální složky (Regulátor 1, 2)	25
Obr. 3.4: Porovnání teploty páry za výstupním přehřívákem pro různé nastavení PI regulátoru ve zpětné vazbě, postupné zvyšování integrační složky (Regulátor 3, 4)	26
Obr. 3.5: Porovnání teploty páry za výstupním přehřívákem s a bez uvažovaného posunutí dodaného tepelného příkonu	26
Obr. 3.6: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výstupního přehříváku s žádanou hodnotou elektrického výkonu	27
Obr. 3.7: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty I s žádanou hodnotou elektrického výkonu	28
Obr. 3.8: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty I s žádanou hodnotou elektrického výkonu po aplikaci filtru	28
Obr. 3.9: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty II s žádanou hodnotou elektrického výkonu	29
Obr. 3.10: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty II s žádanou hodnotou elektrického výkonu po aplikaci filtru	29
Obr. 3.11: Rozdělení měření na patnáct úseků A až O znázorněné na průběhu žádaného výkonu	31
Obr. 3.12: Porovnání modelu a měření v úseku A (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)	32
Obr. 3.13: Porovnání modelu a měření v úseku A (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)	32

Obr. 3.14: Porovnání modelu a měření v úseku A (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	33
Obr. 3.15: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupného přehříváku v úseku A s odhadem střední hodnoty.....	33
Obr. 3.16: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku A s odhadem střední hodnoty	34
Obr. 3.17: Porovnání modelu a měření v úseku B (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	35
Obr. 3.18: Porovnání modelu a měření v úseku B (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	35
Obr. 3.19: Porovnání modelu a měření v úseku B (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	36
Obr. 3.20: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupného přehříváku v úseku B s odhadem střední hodnoty.....	36
Obr. 3.21: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku B s odhadem střední hodnoty	37
Obr. 3.22: Porovnání modelu a měření v úseku C (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	38
Obr. 3.23: Porovnání modelu a měření v úseku C (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	38
Obr. 3.24: Porovnání modelu a měření v úseku C (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	39
Obr. 3.25: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupného přehříváku v úseku C s odhadem střední hodnoty.....	39
Obr. 3.26: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku C s odhadem střední hodnoty	40
Obr. 3.27: Porovnání modelu a měření v úseku D (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	41

Obr. 3.28: Porovnání modelu a měření v úseku D (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	41
Obr. 3.29: Porovnání modelu a měření v úseku D (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	42
Obr. 3.30: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku D s odhadem střední hodnoty.....	42
Obr. 3.31: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku D s odhadem střední hodnoty	43
Obr. 3.32: Porovnání modelu a měření v úseku E (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	44
Obr. 3.33: Porovnání modelu a měření v úseku E (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	44
Obr. 3.34: Porovnání modelu a měření v úseku E (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	45
Obr. 3.35: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku E s odhadem střední hodnoty.....	45
Obr. 3.36: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku E s odhadem střední hodnoty	46
Obr. 4.1: Princip přímé identifikace bez přídavného signálu v uzavřeném regulačním obvodu.	50
Obr. 4.2: Schéma pro ověření metody přímé identifikace bez přídavného signálu pro různé hodnoty w	52
Obr. 4.3: Odezva výstupní veličiny y na poruchový signál pro různé hodnoty w	53
Obr. 4.4: Odezva akční veličiny u na poruchový signál pro různé hodnoty w	53
Obr. 4.5: Proložení naměřených dat spline křivkou (teplota páry za výstupním přehřívákem úsek měření H)	54
Obr. 4.6: Model ARX (shodný s IV4).....	55
Obr. 4.7: Model ARX (Fit index 41,59 %) a model IV4 (Fit index 36,24 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření L	56
Obr. 4.8: Model ARX (Fit index 27,44 %) a model IV4 (Fit index 37,61 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření H.....	57
Obr. 4.9: Model ARMAX	58
Obr. 4.10: Model BJ.....	58

Obr. 4.11: Model OE.....	58
Obr. 4.12: Model ARMAX (Fit index 47,01 %), model BJ (Fit index 45,33 %), model OE (Fit index 77,09 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření L	59
Obr. 4.13: Model ARMAX (Fit index 40,51 %), model BJ (Fit index 41,33 %), model OE (Fit index 5,23 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření H	60
Obr. 4.14: Struktura modelu NARX	61
Obr. 4.15: Struktura modelu Hammerstein	61
Obr. 4.16: Model NARX (Fit index 43,09 %), model Hammerstein (Fit index 30,69 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření L.....	62
Obr. 4.17: Model NARX (Fit index -31,31 %), model Hammerstein (Fit index -34,2 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření H	62
Obr. 4.18: Rekurzivní ARX (Fit index 97,7 %) pro výstupní přehřívák, úsek měření L.....	63
Obr. 4.19: Rekurzivní ARX (Fit index 96,3 %) pro výstupní přehřívák, úsek měření H	64
Obr. 7.1: Porovnání modelu a měření v úseku F (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	69
Obr. 7.2: Porovnání modelu a měření v úseku F (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	59
Obr. 7.3: Porovnání modelu a měření v úseku F (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	70
Obr. 7.4: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku F s odhadem střední hodnoty.....	70
Obr. 7.5: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku F s odhadem střední hodnoty	71
Obr. 7.6: Porovnání modelu a měření v úseku H (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	72
Obr. 7.7: Porovnání modelu a měření v úseku H (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	72
Obr. 7.8: Porovnání modelu a měření v úseku H (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	73

Obr. 7.9: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku H s odhadem střední hodnoty.....	73
Obr. 7.10: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku H s odhadem střední hodnoty	74
Obr. 7.11: Porovnání modelu a měření v úseku I (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	75
Obr. 7.12: Porovnání modelu a měření v úseku I (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	75
Obr. 7.13: Porovnání modelu a měření v úseku I (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	76
Obr. 7.14: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku I s odhadem střední hodnoty.....	76
Obr. 7.15: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku I s odhadem střední hodnoty	77
Obr. 7.16: Porovnání modelu a měření v úseku L (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	78
Obr. 7.17: Porovnání modelu a měření v úseku L (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	78
Obr. 7.18: Porovnání modelu a měření v úseku L (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	79
Obr. 7.19: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku L s odhadem střední hodnoty.....	79
Obr. 7.20: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku L s odhadem střední hodnoty	80
Obr. 7.21: Porovnání modelu a měření v úseku M (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	81
Obr. 7.22: Porovnání modelu a měření v úseku M (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	81

Obr. 7.23: Porovnání modelu a měření v úseku M (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	82
Obr. 7.24: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupného přehříváku v úseku M s odhadem střední hodnoty.....	82
Obr. 7.25: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku M s odhadem střední hodnoty	83
Obr. 7.26: Porovnání modelu a měření v úseku N (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	84
Obr. 7.27: Porovnání modelu a měření v úseku N (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	84
Obr. 7.28: Porovnání modelu a měření v úseku N (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	85
Obr. 7.29: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupného přehříváku v úseku N s odhadem střední hodnoty.....	85
Obr. 7.30: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku N s odhadem střední hodnoty	86
Obr. 7.31: Porovnání modelu a měření v úseku O (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I).....	87
Obr. 7.32: Porovnání modelu a měření v úseku O (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II).....	87
Obr. 7.33: Porovnání modelu a měření v úseku O (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)	88
Obr. 7.34: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupného přehříváku v úseku O s odhadem střední hodnoty.....	88
Obr. 7.35: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku O s odhadem střední hodnoty	89

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Označení vstupů a výstupů vnějšího subsystému výměníku	19
Tab. 2.2: Měřicí místa (F11 a P11 totožné s T11, F(V1-V3) – chladicí voda)	21
Tab. 2.3: Popis jednotlivých měřících míst vysokotlaké části průtočného kotle	22
Tab. 3.1 Postupné nastavení regulátoru ke stanovení dodaného tepelného příkonu	24
Tab. 3.2: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku A	34
Tab. 3.3: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku B	37
Tab. 3.4: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku C	40
Tab. 3.5: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku D	43
Tab. 3.6: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku E.....	46
Tab. 3.7: Maximální a minimální hodnoty rozdílu mezi modelem a měřením šoty I.....	47
Tab. 3.8: Maximální a minimální hodnoty rozdílu mezi modelem a měřením šoty II	47
Tab. 3.9: Maximální a minimální hodnoty rozdílu mezi modelem a měřením výstupního přehříváku	47
Tab. 3.10: Relativní chyba vztažená k žádané hodnotě teploty páry za výměníky	48
Tab. 4.1: Přehled výsledků jednotlivých metod identifikace	65
Tab. 7.1: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku F	71
Tab. 7.2: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku H	74
Tab. 7.3: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku I.....	77
Tab. 7.4: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku L.....	80
Tab. 7.5: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku M.....	83
Tab. 7.6: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku N	86
Tab. 7.7: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku O	89

Zkratky

ARX	AutoRegressive with eXogenous input
ARMAX	AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputBJ
OE	Output Error Model
BJ	Box-Jenkins Model
IV4	ARX model using four-stage instrumental variable method
NARX	Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input

1 Úvod

Problematika tvorby pokročilých regulačních algoritmů je do velké míry ovlivněna kvalitou dostupného modelu regulované soustavy. Takový model by měl být pro potřeby simulace jednoduchý, ale dostatečně přesný. Kvalitní model může sloužit i pro jiné účely, např. k optimalizaci výrobku nebo tréninku obsluhy. Samotná verifikace modelu je proto velmi důležitý proces, který dává návrháři představu o tom, s jak kvalitním a přesným modelem pracuje.

Obor modelování je významný v oblasti energetických zařízení, kde se ve velké míře využívá nasazení řídicí techniky. Modelováním v oblasti energetických zařízení se zabývá práce [2], kde je popsána tvorba modelu průtočného kotle tepelné elektrárny. Tento model vznikl na základě matematicko-fyzikální analýzy a jeho aplikovatelnost byla ověřena korespondencí s literaturou, konkrétními naměřenými daty a spoluprací s praxí. Ačkoliv je model prohlášen za aplikovatelný, není blíže kvantifikováno s jakou přesností popisuje chování regulované soustavy.

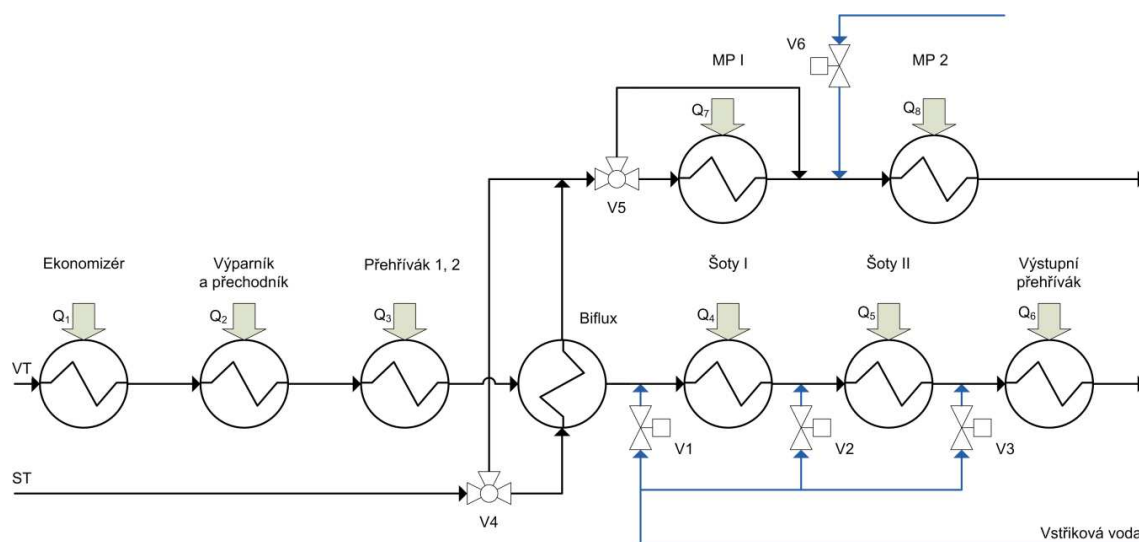
Tato práce se věnuje verifikaci modelu průtočného kotle tepelné elektrárny viz [2] na základě provozních měření. Před samotnou verifikací bylo nutné stanovit některé neměřené veličiny jako neznámý dodaný tepelný příkon do jednotlivých výměníků nebo průtok v některých částech průtočného kotle. Při verifikaci byla chyba modelu kvantifikována na základě kvadratického kritéria, vizuálního porovnání a vybranými statistickými metodami. Z dostupného provozního měření se na základě identifikace hledaly možné vazby mezi vstupními veličinami a výstupní teplotou páry. Jelikož se v tomto případě jednalo o problematiku identifikace v uzavřené smyčce, byla vybrána jako nejvhodnější metoda přímá identifikace bez přídavného signálu na základě prací [4], [5], [6], [7], [8]. Z dosažených výsledků mohla být na závěr provedena diskuze o přesnosti modelu, kvalitě dostupného provozního měření, případném zlepšení některých částí modelu a návrhu ideální metodiky tvorby modelu induktivním přístupem.

2 Nelineární proces přehřívání páry v průtočném kotli

V této úvodní kapitole bych rád nastínil problematiku přehřívání páry v průtočném kotli, který je základní komponentou tepelných elektráren [1]. Konkrétně se budu zabývat průtočným kotlem v tepelné elektrárně Pruněřov II. Proces přehřívání páry je podobný u všech tepelných elektráren, a proto lze tento popis zobecnit. Dále se budu věnovat nelineárnímu modelu vysokotlakého přehřívání páry [2], který v další části této práce zkonfrontuji s měřením na reálné soustavě.

2.1 Základní princip tepelné elektrárny a průtočného kotle

Jako zdroj paliva v tepelných elektrárnách slouží uhlí, které se přivádí pásovým dopravníkem do kotle. Při spalování uhlí v kotli se uvolní energie v podobě tepla, které je využito na ohřev páry. Průtočný kotel má po všech svých stranách rozvedené potrubí, ve kterém koluje ohřívané medium. Toto potrubí lze rozdělit na několik částí, podle své funkce a polohy v kotli. Obecně lze nazvat tyto části jako výměníky. Výměník je tedy trubka, která předává dodaný tepelný příkon ze spaliny do páry. Tuto sekvenci můžeme nazvat jako přenos tepelné energie spaliny-trubka-pára. K tomuto přenosu tepelné energie dochází buď konvekci nebo i sáláním. Na obrázku 2.1 je vidět zjednodušené schéma průtočného kotle plánovaného po rekonstrukci v tepelné elektrárně Pruněřov II.



Obr. 2.1: Zjednodušené schéma průtočného kotle, převzato z [2]

Při samotném procesu přehřívání páry se čerpá pod tlakem voda do vysokotlaké části, kde nejprve vstupuje do ekonomizéru. Ekonomizér je výměník umístěný v zadním tahu kotle, kde dochází pouze k předehřátí vody. Následně voda vstupuje do výparníku, kde se mění fáze z vody na páru. Výparník může být z hlediska konstrukce řešen různým způsobem [3]. Jsou dva

základní typy výparníků parních kotlů a to výparník s přirozenou cirkulací (bubnový kotel) a výparník průtočný (průtočný kotel). V tomto případě je použit výparník průtočný. Pro zvýšení účinnosti je dále zařazen biflux. Biflux je protiproudý výměník typu trubka v trubce, kde pára vysokotlaké části znovu přehřívá páru středotlaké části průtočného kotle. Vysokotlakou část průtočného kotle před bifluxem tvoří ekonomizér, výparník, přehřívák 1 a přehřívák 2. V této části nedochází k řízení teploty páry pomocí vstřikování vody. Za bifluxem následuje část, kde jsou zařazeny před každým výměníkem směšovače, které promísí nasycenou páru se vstřikovou vodou. Podle množství přivedené vstřikové vody se reguluje teplota páry. Ve vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem jsou zařazeny tři výměníky nazvané šoty 1, šoty 2 a výstupní přehřívák. Úkolem této výstupní části průtočného kotle je zajistit technologicky správnou teplotu páry, vstupující do vysokotlaké části soustrojí turbogenerátoru.

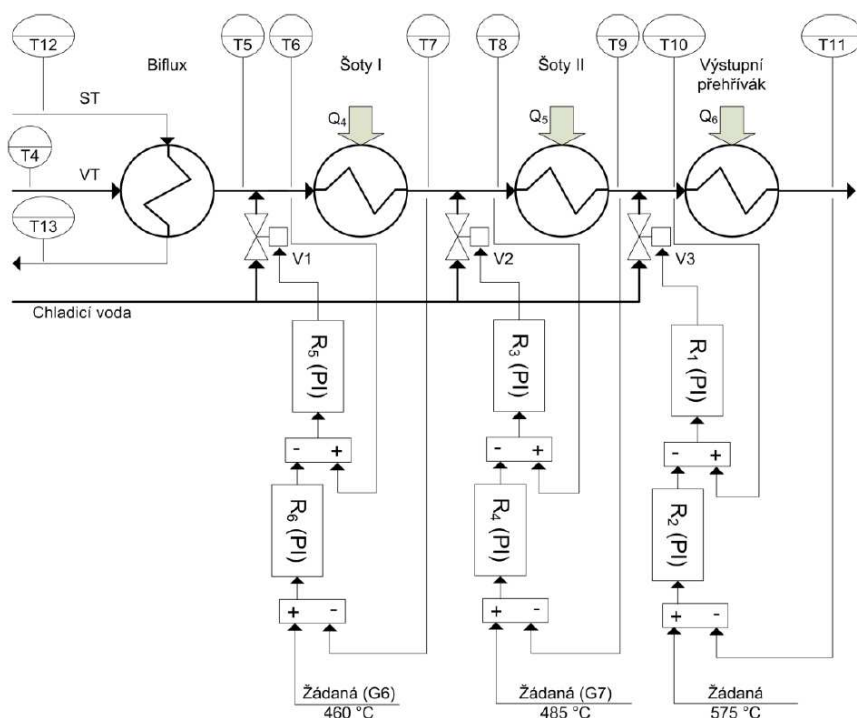
Turbogenerátor je elektromechanické soustrojí složené z turbíny a alternátoru [3]. Oba stroje jsou spojeny společným hřídelem. Tepelná a mechanická energie páry se předává turbíně, která roztáčí alternátor. Alternátor následně dodává elektrickou energii do rozvodné soustavy. Turbínu v elektrárně Průněřov II lze rozdělit na tři části. První část je tzv. vysokotlaký díl do kterého vstupuje pára z vysokotlaké části průtočného kotle. Pára svým průchodem přes lopatky turbíny předá tepelnou energii a přemění ji v mechanickou, následně pak alternátor v elektrickou. Druhá část je tzv. středotlaký díl. Do tohoto dílu vstupuje pára, která přišla o část své energie na vysokotlakém dílu a přehřívá páru ze středotlaké části průtočného kotle. Část páry je odtud vedena zpět do středotlaké části průtočného kotle za účelem zvýšení účinnosti a část páry je použita pro topné účely. Dále následuje nízkotlaký díl turbíny. Zbylá pára kondenzuje v chladících věžích na vodu, která se znovu připravuje pro opětovné použití.

Středotlaká část je oběh, kterým se vrací pára ze středotlakého dílu turbíny zpět na přehřívání do průtočného kotle. Na středotlaké části průtočného kotle je v tomto případě zařazen výměník typu biflux a následně dva výměníky MP1 a MP2 (obr. 2.1).

2.2 Nelineární model vysokotlakého přehřívání páry

Nelineární model vysokotlakého přehřívání páry byl vytvořen deduktivním přístupem, tedy matematicko-fyzikální analýzou průtočného kotle tepelné elektrárny Pruněřov II a jeho vytvoření je blíže popsáno v práci [2]. Je zde nutné uvést některé jeho základní vlastnosti a použití.

Tento nelineární model popisuje základní koloběh vody a páry v průtočném kotli. Jelikož model uvažuje známý dodaný tepelný příkon do výměníků, neřeší sekvenci přenosu tepelné energie spaliny-trubka-pára, ale pouze trubka-pára. Díky této myšlence odpadla problematika popisu přestupu tepla mezi spaliny a potrubím. Nebylo tedy zapotřebí řešit, zda se jedná o přenos tepla konvekcí nebo sáláním, případně konvekcí a sáláním v závislosti na poloze výměníku v kotli. Dále je nutno podotknout, že model není nijak linearizován ani vztažen k určitému pracovnímu bodu, ale popisuje nelineární regulovanou soustavu v celém jejím pracovním rozsahu. Model také obsahuje řídicí obvody, které jsou řešeny pro každý z přehříváků kaskádní regulací, jak je znázorněno na obrázku 2.2. Regulátory pracují jako regulátory typu PI(D) s proměnnými parametry, přičemž jsou zachovány všechny ochrany a omezení jako u reálné soustavy. Pro potřeby této práce používám pouze úsek vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem zmíněného modelu (šoty I, šoty II a výstupní přehřívák) (obr. 2.3).

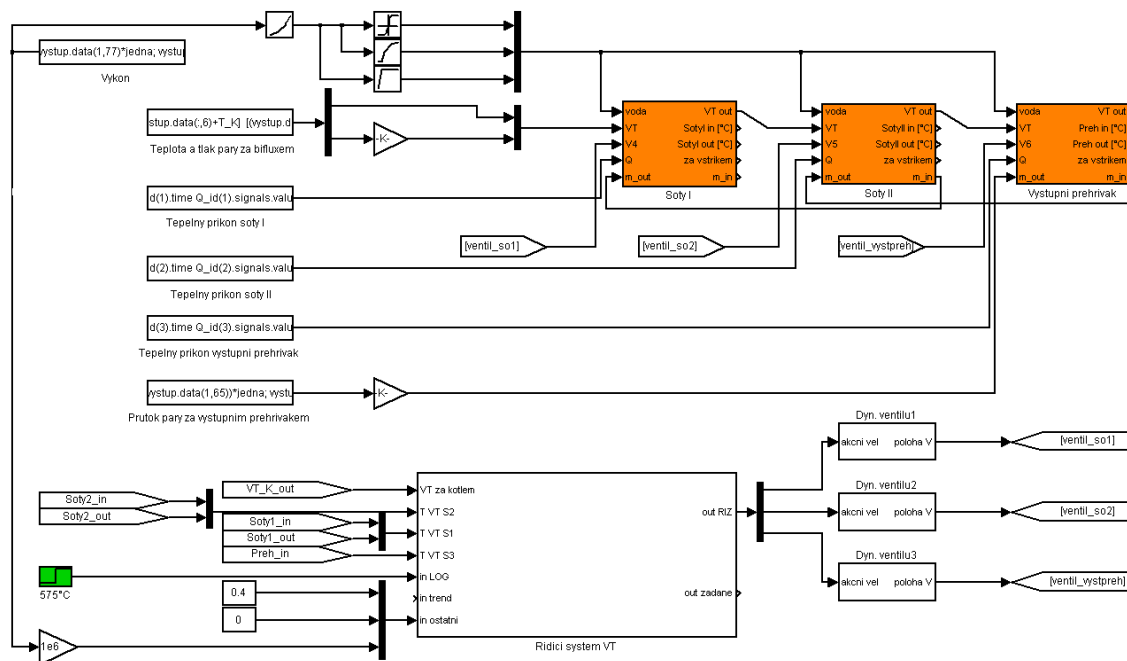


Obr. 2.2: Kaskádní řízení teploty páry vysokotlaké části průtočného kotle, převzato z [2]

Simulační model řízené soustavy je vytvořen ve výpočetním programu Matlab/Simulink. Před zahájením samotné simulace je zapotřebí spustit zaváděcí soubor, který nastaví všechny významné parametry. Jednotlivé proměnné v zaváděcím souboru představují konstrukční vlastnosti výměníků, jako je např. jejich hmotnost, rozměry trubek, vnitřní průměr, vnější průměr, síla stěny a jejich délka, měrná tepelná kapacita, hustota apod. Dále jsou zde definovány tvary některých významných matic pro simulaci. Všechny veličiny mají reálnou velikost a celý model zachovává měřicí místa. Každý výměník představuje v Simulinku vnější subsystém, který v sobě kromě vlastního řešení rovnic přehřívání páry zahrnuje i subsystém dynamiky předřazeného směšování a ventilu. Pro získání vlastností páry je použita podpůrná dynamická knihovna FluidProp, kterou lze implementovat do výpočetního programu Matlab. Základní myšlenkou aplikace této knihovny je získat hledané vlastnosti páry na základě znalostí některých jejích jiných parametrů. Typickým příkladem může být hledání hustoty páry, pokud je známá teplota a tlak. Všechny vnější subsystémy obsahují vstupy a výstupy, které jsou společné pro všechny výměníky a jsou popsány v tabulce 2.1. Vlastnosti vody a páry jsou definovány třemi veličinami (teplota, průtok, tlak). Simulační schéma na obrázku 2.3 je již modifikováno pro použití s reálnými měřenými daty. Nevýhodou těchto dat je, že některé použité veličiny pro simulaci, jako např. průtok nebo dodaný tepelný příkon, nejsou měřeny ve všech potřebných místech nebo nejsou měřeny vůbec. Jelikož je ve vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem průtok měřen pouze za výstupním přehřívákem, upravil jsem simulační schéma tak, že se průtok před všemi výměníky zpětně dopočítává. Z důvodu tohoto výpočtu jsem zmíněné vlastnosti páry (teplota, průtok, tlak) přivedl pomocí dvou samostatných vstupů do vnějšího subsystému. Vstupem VT je přivedena teplota a tlak. Speciálním vstupem m_{out} je přiveden průtok. Jakým způsobem lze dopočítat průtok v jednotlivých místech a jakým způsobem lze získat dodaný tepelný příkon pro potřeby simulace popíšu v další části této práce. Vlastnosti vody (teplota, průtok, tlak) jsou ve výchozím simulačním modelu lineárně odvozené od výkonové hladiny průtočného kotle. Model řídicího systému slouží ke generování akčního zásahu, ale mohu jej využít i k nastavení počátečních podmínek.

Před prvním spuštěním modelu je nutné nastavit počáteční podmínky u všech integrátorů (stavových veličin) tak, aby odpovídaly právě uvažované výkonové hladině průtočného kotle. Je velmi obtížné tuto počáteční hodnotu manuálně nastavit, ale mohu k tomu využít samotného zpětnovazebního zapojení modelu výměníků a modelu řídicího systému. Za tímto účelem jsem upravil měřená data tak, že nechám jejich první hodnotu po určitou dobu konstantní. Model řídicího systému se bude po tuto dobu snažit vhodným akčním zásahem dovést celý systém do požadovaného počátečního stavu. Řídicí systém tedy nastaví žádanou hodnotu na výstupu při konstantní hodnotě všech vstupů. Po této konstantní části, kdy se ustálí hodnoty všech integrátorů, již lze simulovat zbývajících úsek měření. Po prvním nastavení počátečních

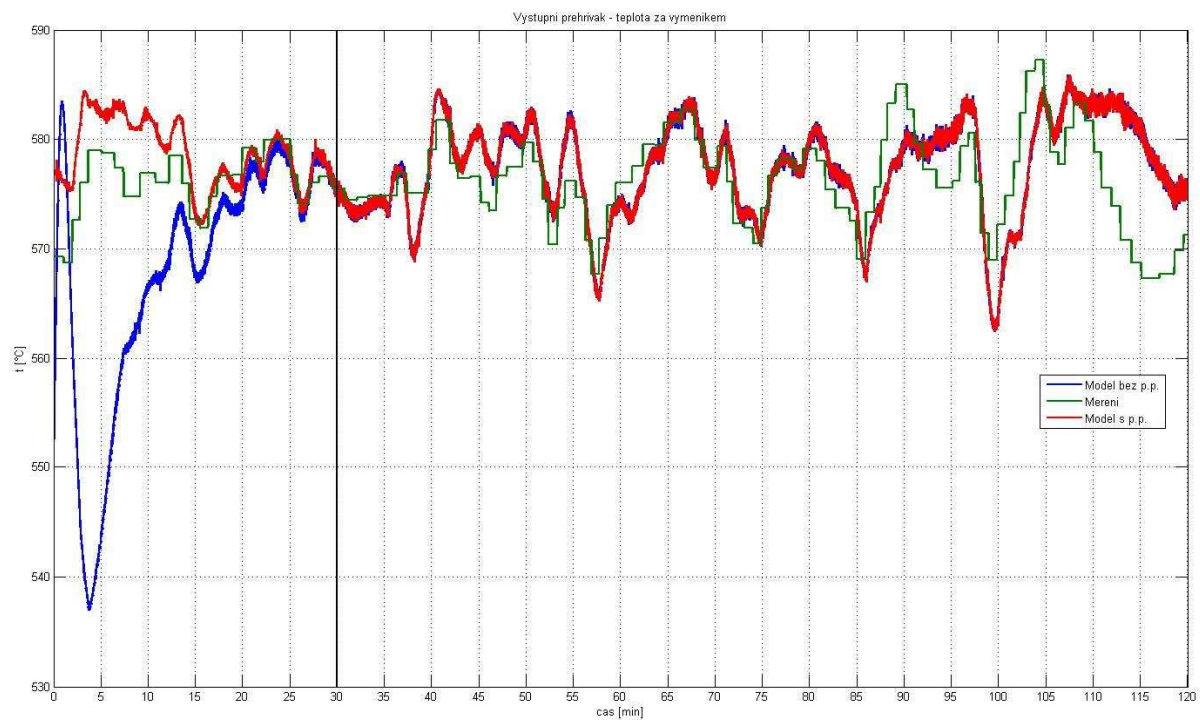
podmínek, jsem již podobným způsobem postupovat nemusel, jelikož je Simulink schopen uchovávat informaci o aktuálním stavu všech integrátorů. Porovnání průběhu teploty páry modelu a měření za výstupním přehřívákem s ošetřením a bez ošetření počátečních podmínek je znázorněno na obrázku 2.4. Můžeme si všimnout, že se průběh bez nastavení počátečních podmínek prvních 30 minut značně liší.



Obr. 2.3: Simulační schéma vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem s řídicím systémem

Tab. 2.1: Označení vstupů a výstupů vnějšího subsystému výměníku

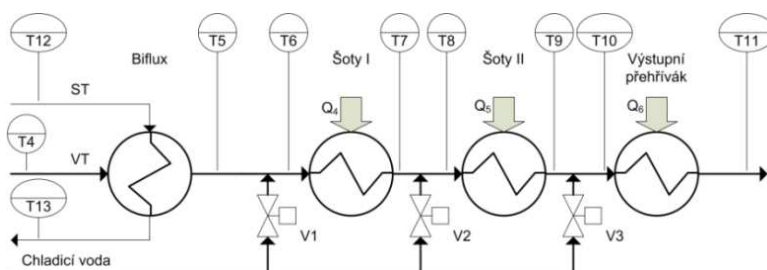
Označení vstupu/výstupu	Popis
voda	vlastnosti vody na vstupu (teplota, průtok, tlak)
VT	vlastnosti páry na vstupu (teplota, tlak)
V4, V5, V6	akční zásah k řízení polohy regulačního ventilu vody
Q	dodaný tepelný příkon do výměníku
m_out	průtok páry na výstupu
VT out	vlastnosti páry na výstupu (teplota, průtok, tlak)
Soty I, Soty II, Preh in [°C]	teplota páry na vstupu do výměníku
Soty I, Soty II, Preh out [°C]	teplota páry na výstupu z výměníku
za vstřikem	vlastnosti páry za vstřikem (teplota, průtok, tlak)
m_in	průtok páry na vstupu



Obr. 2.4: Porovnání průběhu teploty páry modelu a měření za výstupním přehřívákem s ošetřením a bez ošetření počátečních podmínek

2.3 Měření reálného provozu průtočného kotle

Jelikož jsou k dispozici apriorní informace v podobě měření reálného provozu tepelné elektrárny Tušimice II, je dobré zmapovat jaké veličiny a v kterých místech jsou měřeny. Toto měření mohu použít pro verifikaci modelu průtočného kotle tepelné elektrárny Prunéřov II, a to z toho důvodu, že obě elektrárny mají obdobnou konstrukci. V tomto případě se jedná o měření regulované soustavy v uzavřené smyčce, což bude mít v další části této práce, věnované identifikaci, určité důsledky. Pro zjednodušení se omezím na popis měření v úseku vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem, potřebného pro mou práci (obr. 2.5). Dále je nutno podotknout, že celý oběh přehřívání páry je konstrukčně složen ze dvou stejných paralelních vedení a postačí, když se budu zabývat pouze jedním z nich.



Obr. 2.5: Vysokotlaká část průtočného kotle za bifluxem, převzato z [2]

Mezi základní veličiny měřené na technologii patří teplota, průtok, tlak, velikost akčního zásahu ventilu a elektrický výkon turbíny (tab. 2.2, 2.3 a obr. 2.5). K dispozici je záznam měření přibližně z jednoho dne provozu. Celý úsek měření je rozdělen na 15 částí pro lepší orientaci a práci s těmito daty.

Tab. 2.2: Měřicí místa (F11 a P11 totožné s T11, F(V1-V3) – chladicí voda)

	Měřicí místa
Teplota [°C]	T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11
Průtok [kg/s]	F11, F(V1-V3)
Tlak [MPa]	P11
Elektrický výkon turbíny [MWe]	Výkon z terminálu
Akční zásah ventilů	V1, V2, V3

Tab. 2.3: Popis jednotlivých měřících míst vysokotlaké části průtočného kotle

T5	Teplota páry na vstupu do vysokotlaké části za bifluxem
T6	Teplota páry za prvním vstřikováním
T7	Teplota páry za výměníkem (šoty I)
T8	Teplota páry za druhým vstřikováním
T9	Teplota páry za výměníkem (šoty II)
T10	Teplota páry za třetím vstřikováním
T11	Teplota páry za výměníkem (výstupní přehřívák), výstupní teplota.
F11	Průtok páry za výměníkem (výstupní přehřívák), výstupní průtok.
F(V1-V3)	Průtok vstřikové vody všemi ventily (chladicí voda)
P11	Tlak páry za výměníkem (výstupní přehřívák), výstupní tlak.
Výkon z terminálu	Elektrický výkon turbíny měřený z terminálu
V1	Akční zásah ventilu V1
V2	Akční zásah ventilu V2
V3	Akční zásah ventilu V3A a V3B

Jak už bylo jednou řečeno, velkou nevýhodou je, že měření neobsahuje dodaný tepelný příkon do výměníků. Pro práci s modelem, a pozdější účely identifikace, bude také potřeba znát průtok po samotném vstřikování, tedy průtok před každým výměníkem. Jelikož je ve vysokotlaké části průtočného kotle za bifluxem znám pouze průtok F11 za výstupním přehřívákem, musel jsem průtok před jednotlivými výměníky zpětně dopočítat. To mohu udělat tak, že od průtoku F11 odečtu průtok oběma ventily V3A a V3B, čímž dostanu průtok F8 výměníkem (šoty II). Od průtoku F8 odečtu průtok ventilem V2, čímž dostanu průtok F6 výměníkem (šoty I). Abych mohl takto postupovat, musel jsem ještě dopočítat průtok jednotlivými ventily z velikosti akčního zásahu a charakteristiky ventilů [2]. Podle stejné úvahy se rovnou dopočítávají i průtoky u modelu vysokotlaké části průtočného kotle (obr. 2.3 – zpětně vedený průtok vstupem m_{out}).

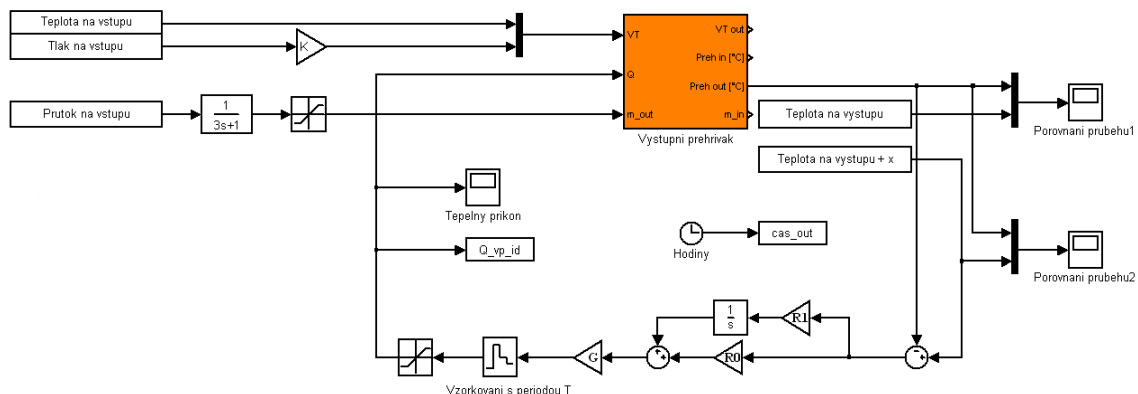
Po všech těchto výpočtech jsem měl k dispozici potřebné průtoky v jednotlivých částech vysokotlaké části průtočného kotle pro účely identifikace a práci s modelem. Poslední veličinou, kterou jsem se musel zabývat, je dodaný tepelný příkon do výměníků, který není měřený, ale model předpokládá jeho znalost.

3 Verifikace modelu a problematika tepelného příkonu

3.1 Stanovení dodaného tepelného příkonu

Jednou z možností, jak stanovit dodaný tepelný příkon do výměníků, je popsat tento přenos na základě matematicko-fyzikální analýzy. Některé takové přístupy stanovení dodaného tepelného příkonu do výměníků jsou již popsány v práci [2]. Jednou z možností je např. vyjádřit celou sekvenci přenosu tepla spaliny-trubka-pára. Samozřejmě zde vznikají určité problémy, které celý návrh komplikují. Tím nejvýznamnějším je nutnost uvažovat umístění výměníku v kotli a způsob předávání tepelné energie. Je zapotřebí rozlišovat, zda se jedná o přenos tepelné energie konvekcí nebo sáláním, případně konvekcí a sáláním v závislosti na poloze výměníku v kotli. Dále je nutné uvažovat např. o směru proudění spalin v kotli. To vše při zachování co největší jednoduchosti pro potřeby simulace a přesnosti celého modelu.

Zajímavou možností, jak stanovit dodaný tepelný příkon do výměníků, je použít stávající nelineární model regulované soustavy. Musím ovšem vycházet z předpokladu, že námi použitý nelineární model regulované soustavy je platný v celém pracovním rozsahu a věrně reprezentuje její chování. Tento předpoklad vychází z faktu, že model byl vytvořen matematicko-fyzikální analýzou a při vzniku byla ověřena jeho aplikovatelnost dostatečnou korespondencí s literaturou, konkrétními naměřenými daty a spoluprací s praxí [2]. Na základě této myšlenky, a znalosti všech zbývajících veličin, jsem mohl zpětně stanovit dodaný tepelný příkon do výměníků, který je v tomto případě jedinou neznámou. Využil jsem k tomu klasické zapojení PI regulátoru a modelu regulované soustavy ve zpětné vazbě. Blokové schéma je znázorněné na obrázku 3.1. Žádanou hodnotu regulované veličiny v tomto zapojení představuje teplota páry měřená za výměníkem. Akční veličinou je právě dodaný tepelný příkon do výměníku. Celý princip spočívá v tom, že se regulátor snaží generovat potřebný tepelný příkon do výměníku tak, aby odchylka mezi měřenou teplotou páry za výměníkem a teplotou páry na výstupu z modelu byla nulová. Pokud je regulační odchylka mezi měřenou teplotou páry za výměníkem a teplotou páry na výstupu z modelu kladná, regulátor zvětšuje hodnotu dodaného tepelného příkonu do výměníku. Pokud je regulační odchylka záporná, hodnota tepelného příkonu se snižuje úměrně nastavení proporcionální složky regulátoru. Na výstupu regulátoru je ještě zesílení, které zajistí, že tepelný příkon bude v řádu megawattů. Integrační složka regulátoru by měla v ideální případě zajistit nulovou regulační odchylku. Verifikací pak lze zpětně ověřit, jak je model s takto generovaným dodaným tepelným příkonem přesný. Stejnou zpětnovazební strukturou jsem stanovil dodaný tepelný příkon i do zbývajících výměníků šoty I a šoty II.



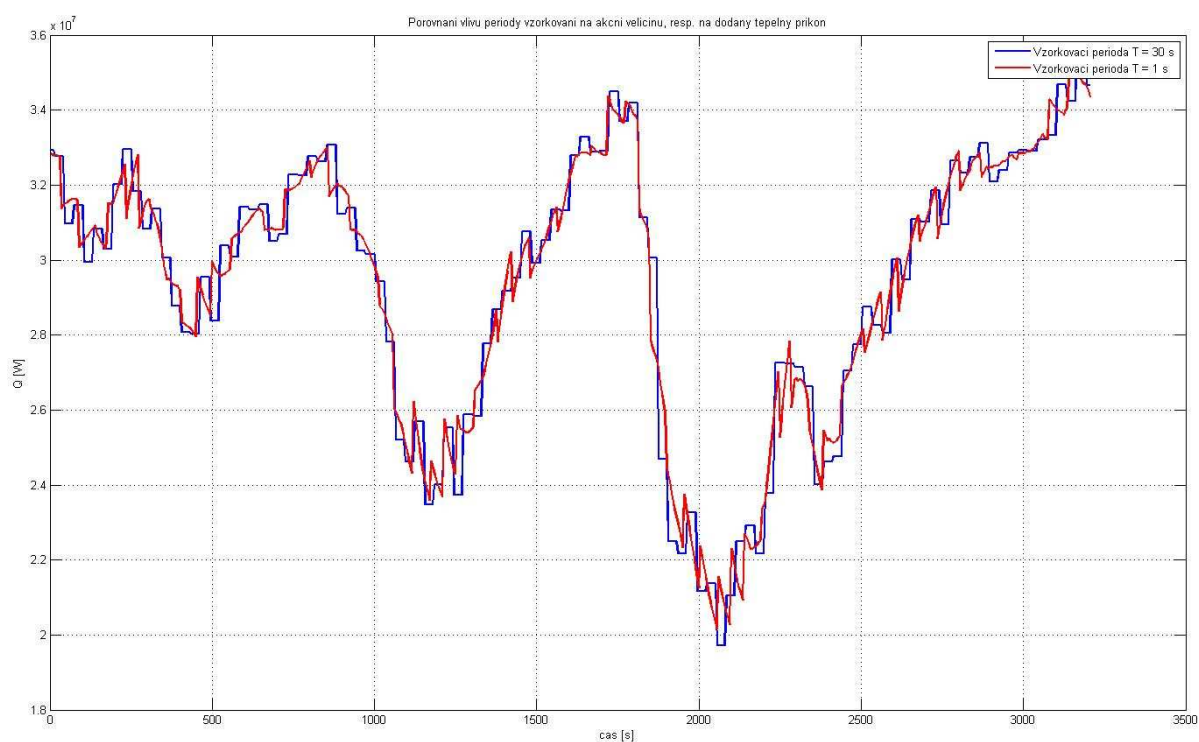
Obr. 3.1: Základní struktura zpětnovazebního zapojení určeného ke stanovení dodaného tepelného příkonu

Pro potřeby stanovení dodaného tepelného příkonu mohu model výměníků zjednodušit. V mém případě stačí vzít vnější subsystém zvoleného výměníku, který obsahuje pouze dynamiku přehřívání páry. Dynamika předřazeného směšování a ventilu nemusí být uvažována. Pro samotný experiment jsou totiž k dispozici měřené nebo vypočtené vlastnosti páry vstupující přímo do výměníku (měřicí místa 6, 8, 10 viz obr. 2.4). Pro generování potřebného dodaného příkonu stačí PI regulátor. Aby nedocházelo k nepřiměřeným kmitům dodaného tepelného příkonu, je akční veličina vzorkována s periodou T (obr 3.2). Jako optimální se jeví nastavit periodu T přibližně 30 s. Hodnoty proporcionální a integrační složky jsem nastavil experimentálně na základě vizuálního porovnání výstupních průběhů teploty páry za výměníkem a kvantitativního vyjádření jejich rozdílů kvadratickým kritériem (vzorec 2). Některé vybrané hodnoty při hledání optimálního nastavení regulátoru jsou uvedeny v tabulce 3.1. Vliv jednotlivých změn proporcionální a integrační složky na průběh výstupní teploty páry je znázorněn na obrázku 3.3 a 3.4. Jelikož regulátor ve zpětné vazbě generuje akční zásah ze současných a minulých hodnot regulační odchylky, dochází ke zpoždění průběhu dodaného tepelného příkonu, resp. posunutí výstupní teploty za výměníkem oproti skutečnosti. Tomuto posunutí předejdu tím, že pošlu žádanou hodnotu na vstup regulátoru s malým předstihem (obr. 3.5).

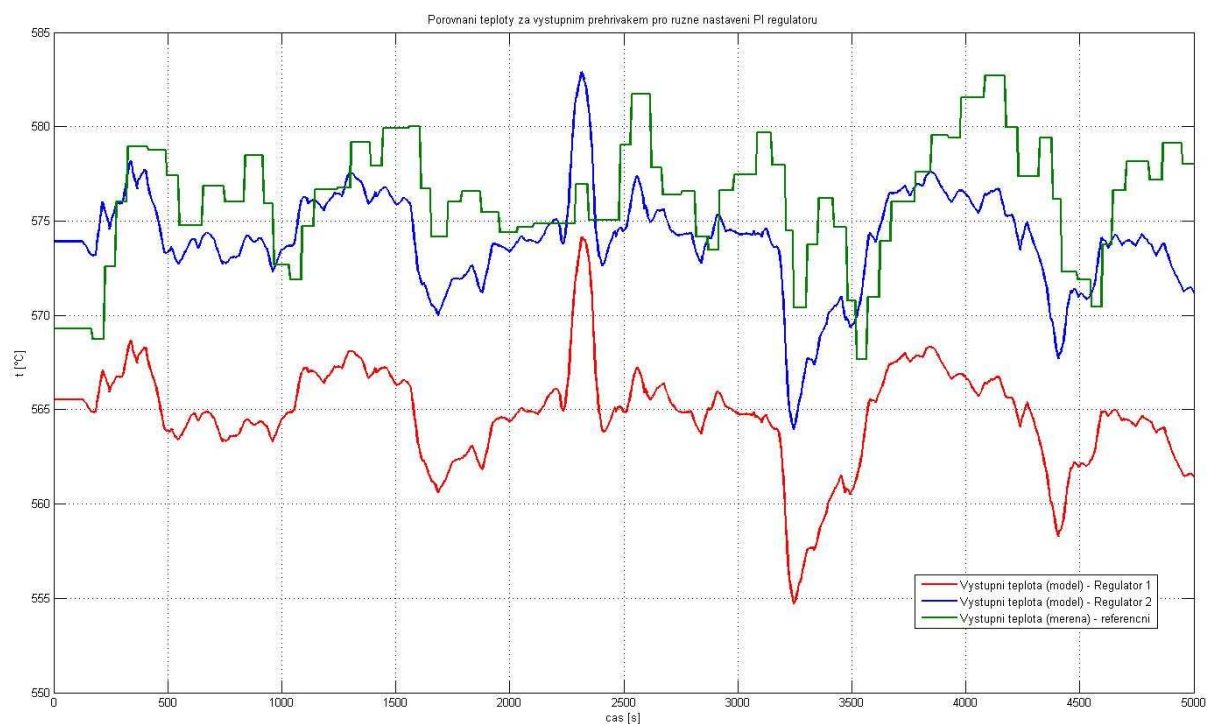
$$J = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2)$$

Tab. 3.1 Postupné nastavení regulátoru ke stanovení dodaného tepelného příkonu

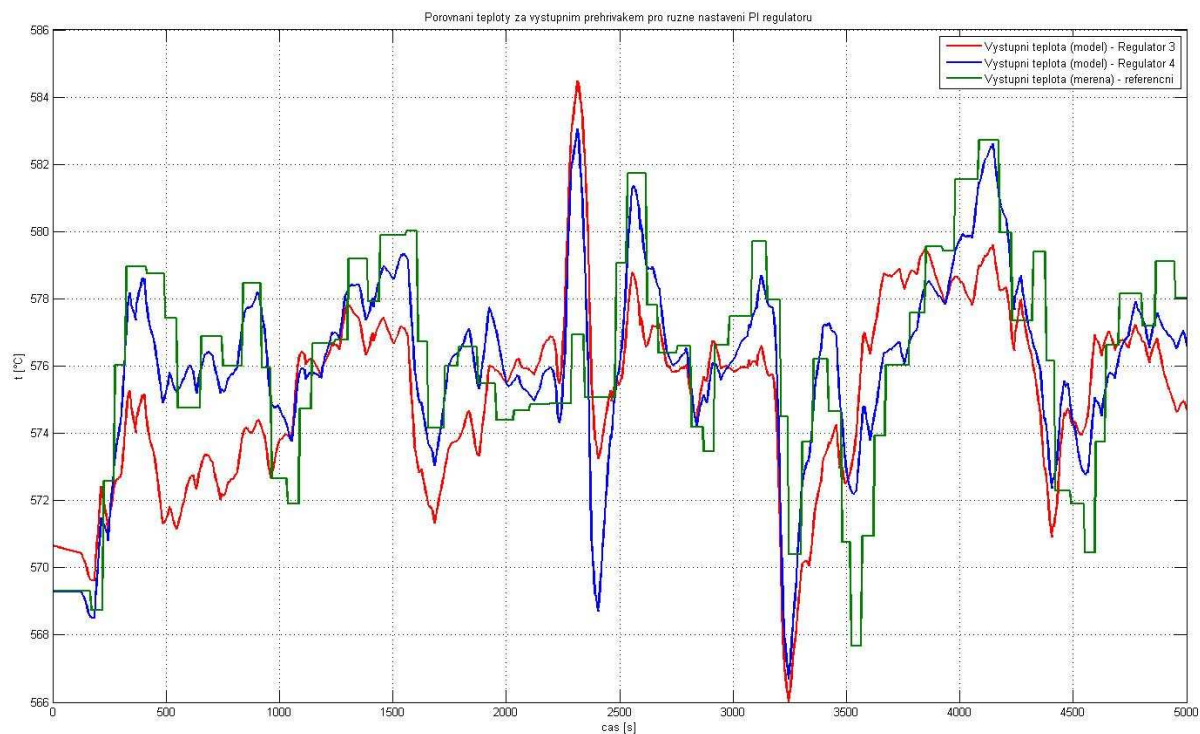
	G	R0	R1	J
Regulátor 1	8e5	0,5	0	216282
Regulátor 2	1e6	0,5	0	40455
Regulátor 3	1e6	0,5	0,001	32869
Regulátor 4	1e6	0,5	0,007	11650



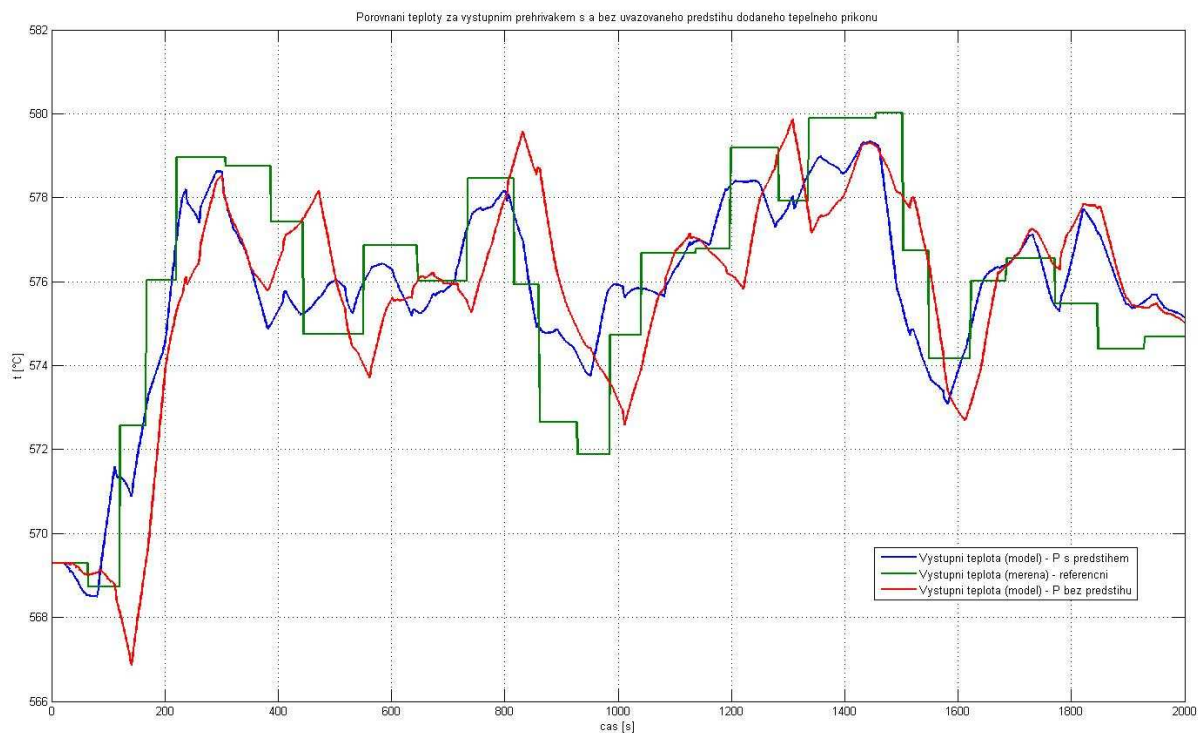
Obr. 3.2: Vliv periody vzorkování T na průběh akční veličiny, resp. na průběh dodaného tepelného příkonu



Obr. 3.3. Porovnání teploty páry za výstupním přehřívákem pro různé nastavení PI regulátoru ve zpětné vazbě, postupné zvyšování proporcionální složky (Regulátor 1, 2)



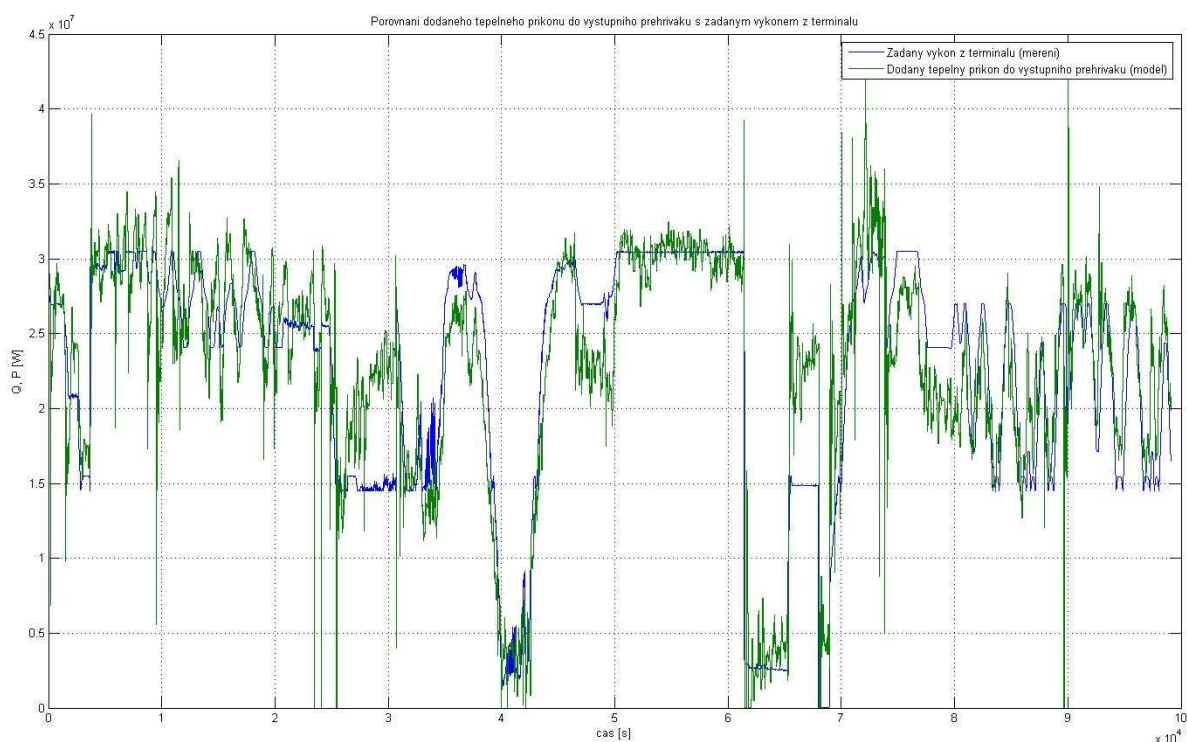
Obr. 3.4: Porovnání teploty páry za výstupním přehřívákem pro různé nastavení PI regulátoru ve zpětné vazbě, postupné zvyšování integrační složky (Regulátor 3, 4)



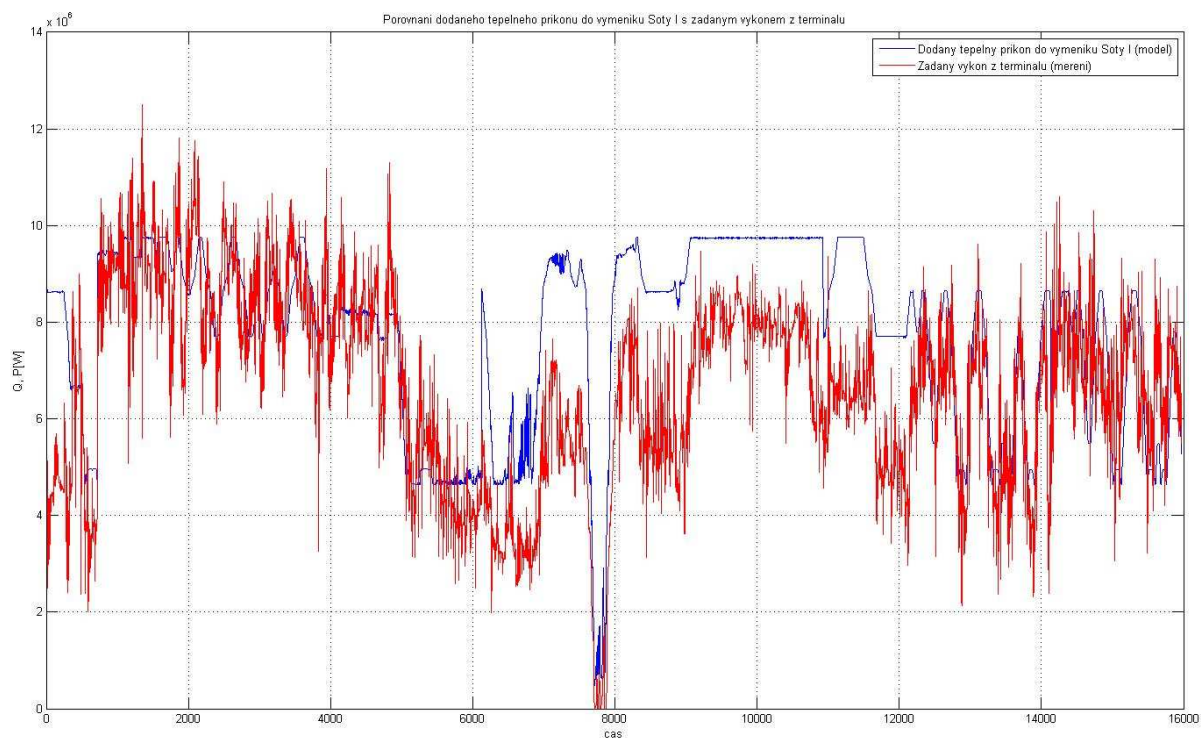
Obr. 3.5: Porovnání teploty páry za výstupním přehřívákem s a bez uvažovaného posunutí dodaného tepelného příkonu

Pokud porovnám tepelný příkon u všech výměníků generovaný výše zmíněnou zpětnovazební strukturou s žádanou hodnotou elektrického výkonu, mohu si všimnout určité podobnosti. Žádaná hodnota elektrického výkonu je normována na takové měřítko, aby bylo možné průběhy porovnat. Největší podobnost vykazuje tepelný příkon dodaný do výstupního přehříváku (obr. 3.6). Tepelný příkon dodaný do výměníku šoty I a šoty II má více stochastický charakter a na první pohled zde není vidět možná souvislost (obr. 3.7, 3.9). Pokud aplikuji na tento generovaný tepelný příkon nekauzální průměrovací filtr (vzorec 3) a odstráním vysokofrekvenční složky signálu, začne být souvislost s žádanou hodnotou elektrického výkonu více patrná (obr. 3.8, 3.10). Tepelný příkon generovaný zpětnovazební strukturou v souvislosti s výkonovou hladinou dává dobré výsledky. Z tohoto důvodu jsem se mohl pokusit v další části této práce najít vazbu mezi dodaným tepelným příkonem a žádanou hodnotou elektrického výkonu pomocí identifikačních metod.

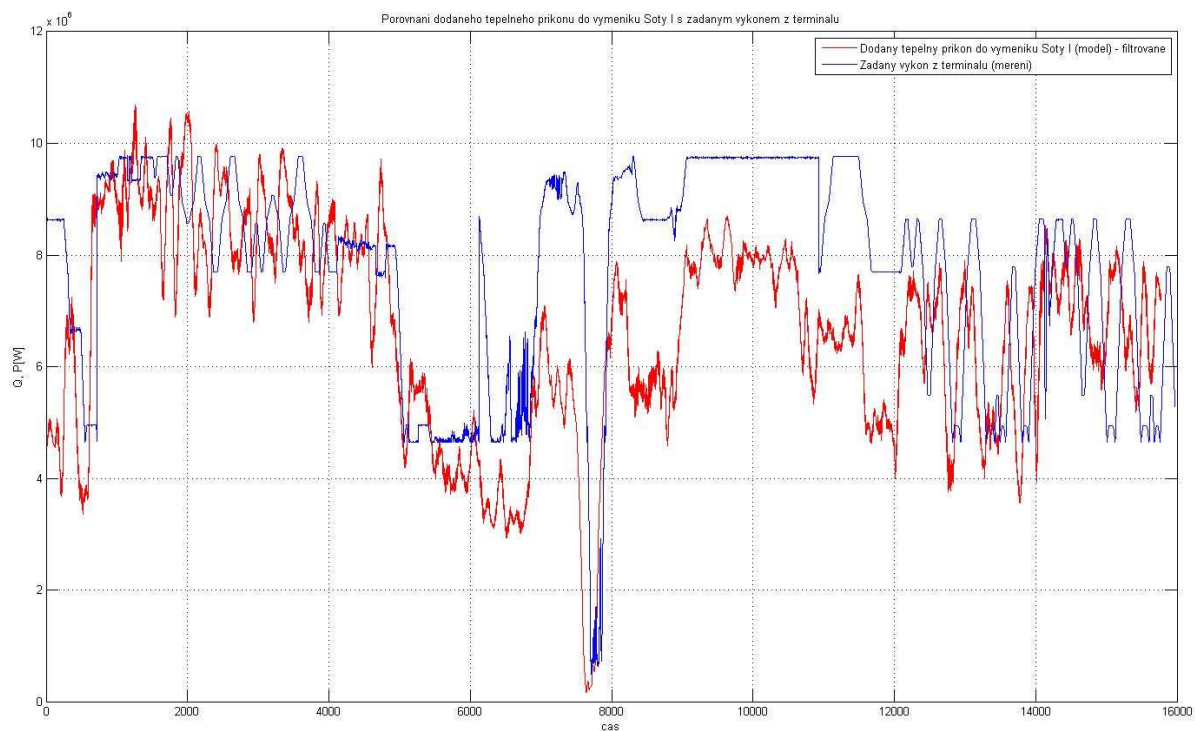
$$Q_F(k) = \frac{1}{11} \sum_{i=-5}^5 Q(k - 5 \cdot i) \quad (3)$$



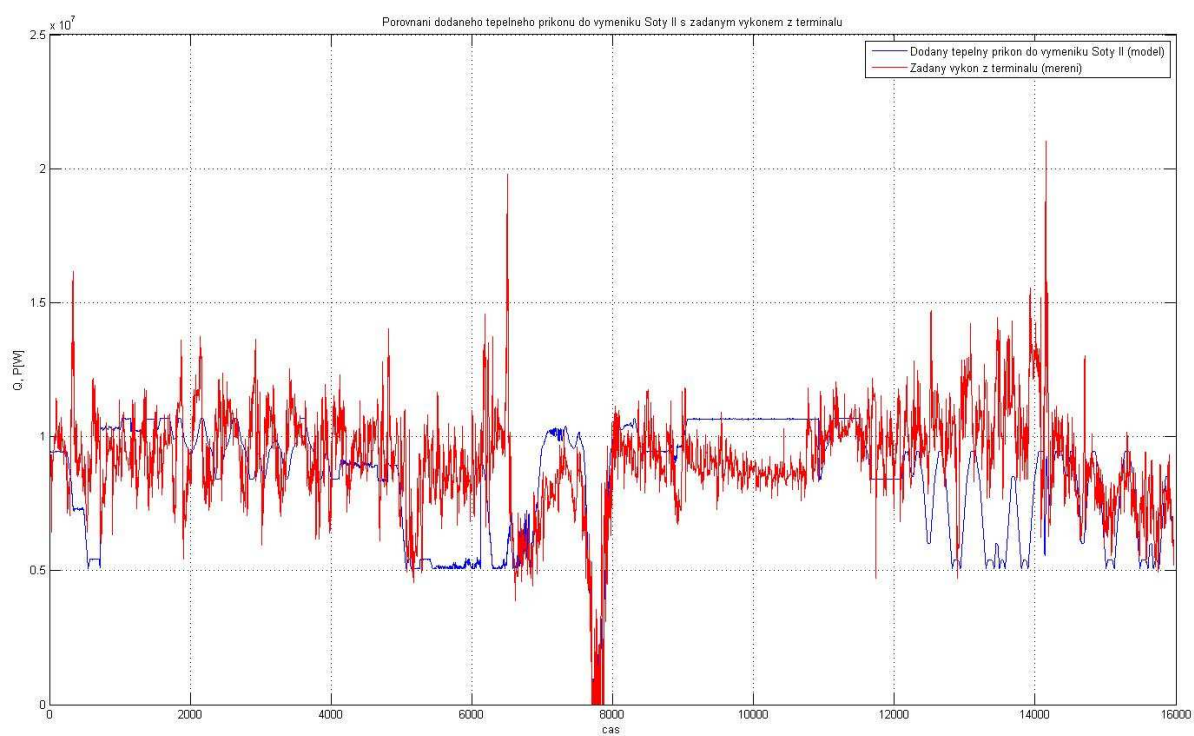
Obr. 3.6: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výstupního přehříváku s žádanou hodnotou elektrického výkonu



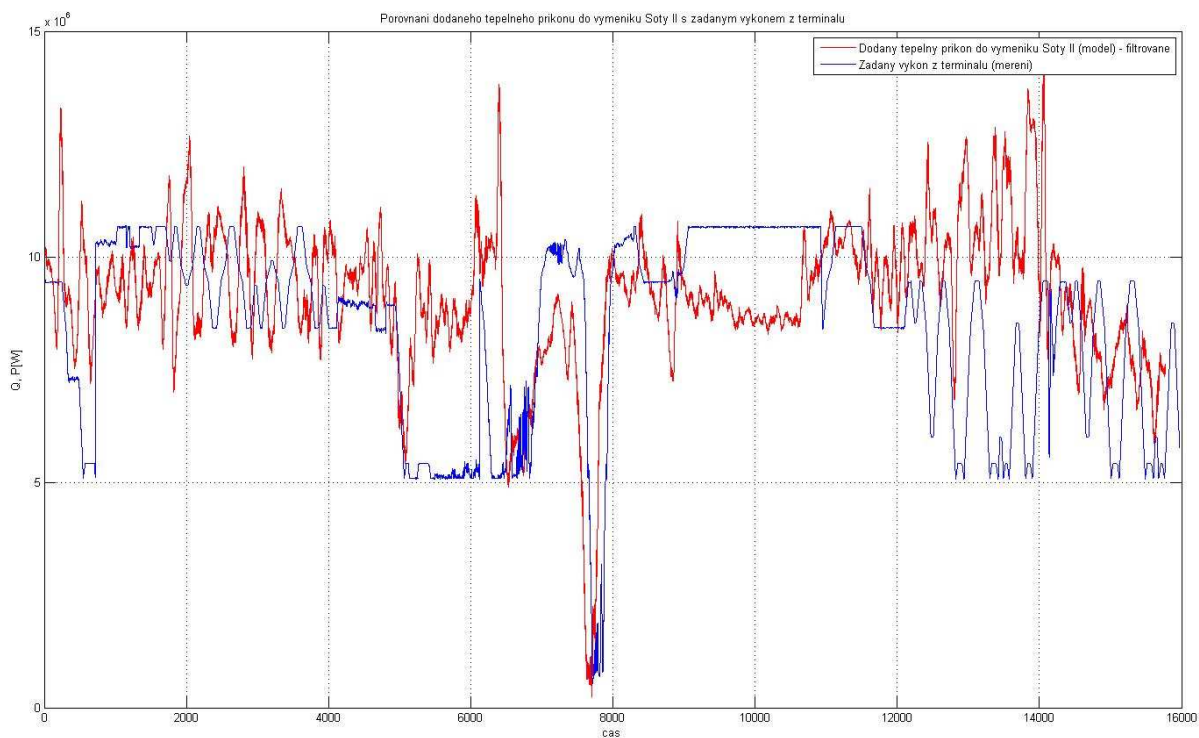
Obr. 3.7: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty I s žádanou hodnotou elektrického výkonu



Obr. 3.8: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty I s žádanou hodnotou elektrického výkonu po aplikaci filtru



Obr. 3.9: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty II s žádanou hodnotou elektrického výkonu



Obr. 3.10: Porovnání generovaného tepelného příkonu do výměníku šoty II s žádanou hodnotou elektrického výkonu po aplikaci filtru

3.2 Verifikace modelu vysokotlaké části průtočného kotle

Všechny kroky, které jsme dosud v této práci provedl, sloužily k tomu, abych mohl začít konfrontovat model vysokotlaké části průtočného kotle se samotným měřením. V tomto okamžiku mám k dispozici pro potřeby simulace a verifikace modelu všechny veličiny. Je ovšem nutné, abych zahrnul generovaný tepelný příkon do samotného modelu. Tato úvaha vychází z faktu, že dodaný tepelný příkon do všech výměníků nebyl znám a byl zpětně generován právě pomocí modelu. Z tohoto důvodu nebudu verifikovat pouze samotný model, ale musím uvažovat i generovaný tepelný příkon. Mým cílem bude kvantifikovat chybu modelu a dodaného tepelného příkonu především pomocí kvadratického kritéria, vizuálního porovnání, případně vybranými statistickými metodami.

Jelikož se výkonová hladina pravidelně mění, bylo by obtížné analyzovat úseky v blízkosti jedné výkonové hladiny. Z tohoto důvodu používám pro zjednodušení stejné rozdělení na úseky A až O použité v balíku měření, které jsem měl k dispozici (obr. 3.11). Toto rozdělení má tu nevýhodu, že odhadnutý střední výkon neodpovídá jedné výkonové hladině, ale pro potřeby verifikace je postačující. Z těchto patnácti úseků měření jsem vybral pro potřeby verifikace pouze některé. Samotný experiment probíhal tak, že jsem pomocí modelu generoval průběhy teploty páry u jednotlivých výměníků na základě měřených a vypočtených vstupních veličin. Následně jsem tyto generované průběhy z modelu konfrontoval se samotným měřením. U vybraných úseků jsem vyjádřil kvantitativně rozdíl mezi teplotou páry modelu a měření za výměníky kvadratickým kritériem J (vzorec 2) a spočítal střední hodnotu příkonu Q_{str} (vzorec 4). Dále jsem vyjádřil rozdíl teploty páry modelu a měření za výměníky, resp. absolutní chybu modelu E (vzorec 5). U takto vyjádřené chyby jsem stanovil její střední hodnotu E_{str} (vzorec 6), výběrovou směrodatnou odchylku E_{std} (vzorec 7), výběrový rozptyl E_{var} (vzorec 8), maximální E_{max} a minimální odchylku E_{min} . Vypočtené hodnoty pro úseky A až E jsou uvedeny v tabulce 3.2 až 3.6. Průběhy pro vizuální porovnání v úseku A až E jsou znázorněny na obrázku 3.12 až 3.36. Další hodnoty a průběhy i pro jiné úseky jsou uvedeny v příloze A až G.

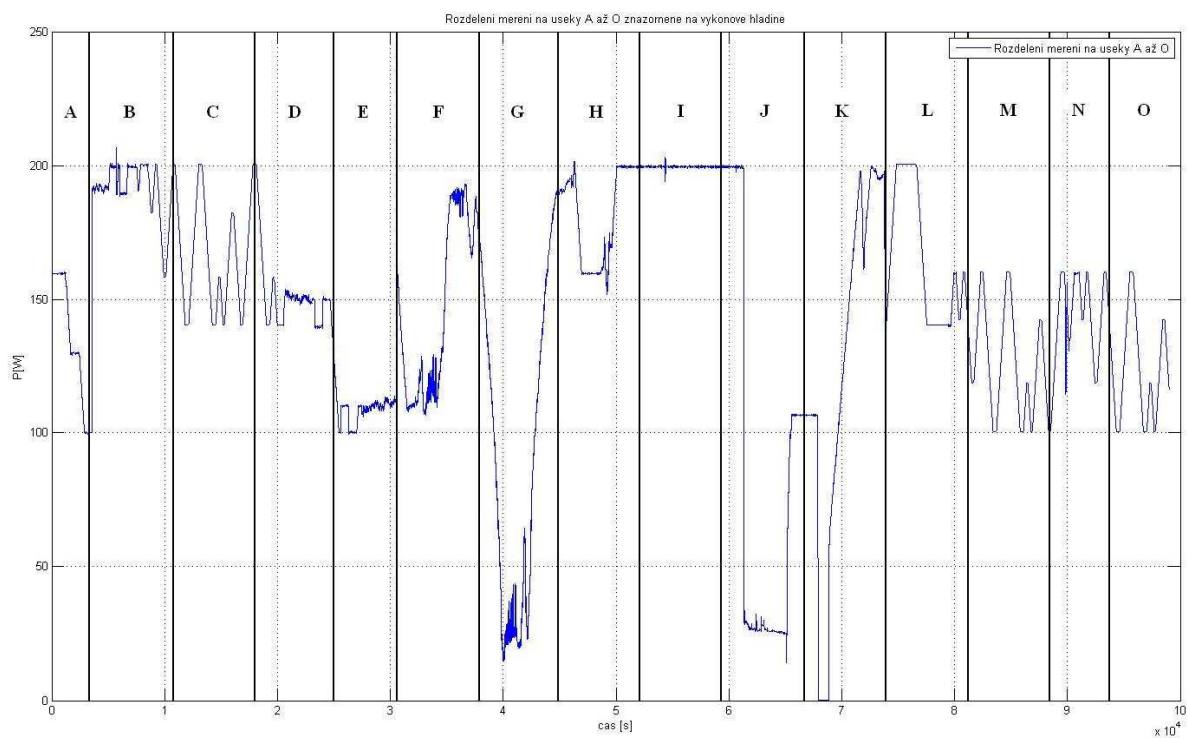
$$Q_{str} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (4)$$

$$E = T_{Mereni} - T_{Model} \quad (5)$$

$$E_{str} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (6)$$

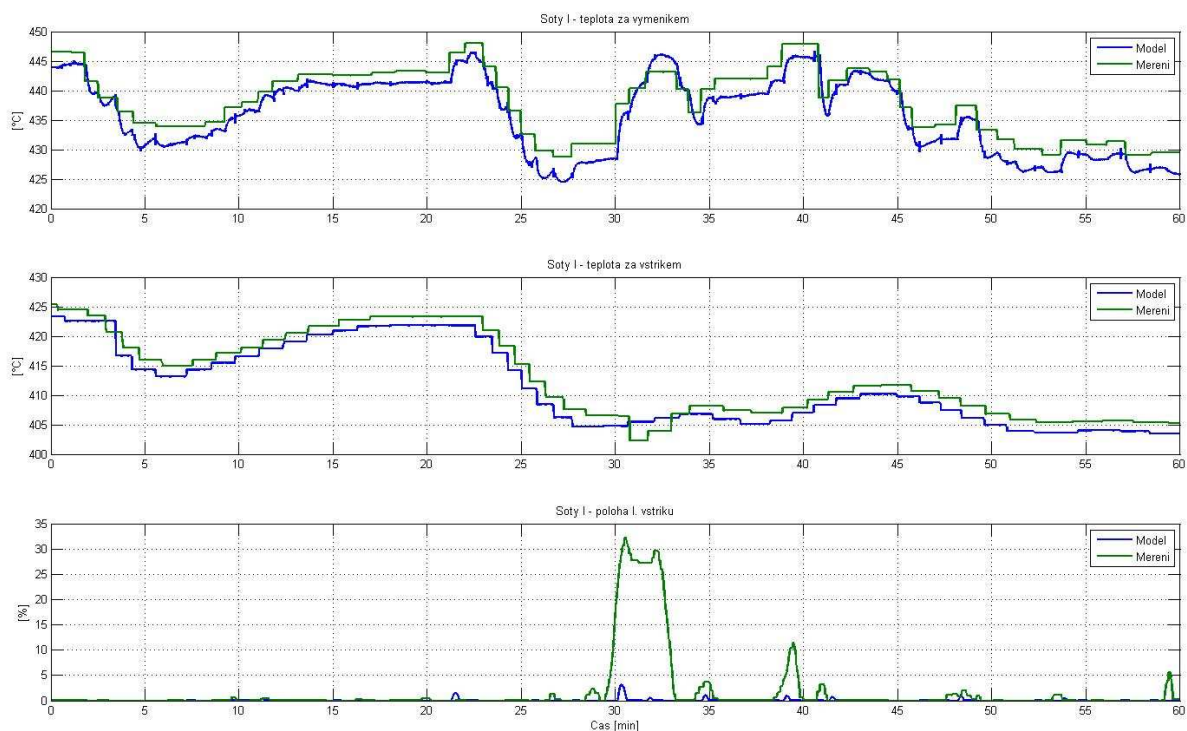
$$E_{std} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i - E_{str})^2} \quad (7)$$

$$E_{var} = E_{std}^2 \quad (8)$$

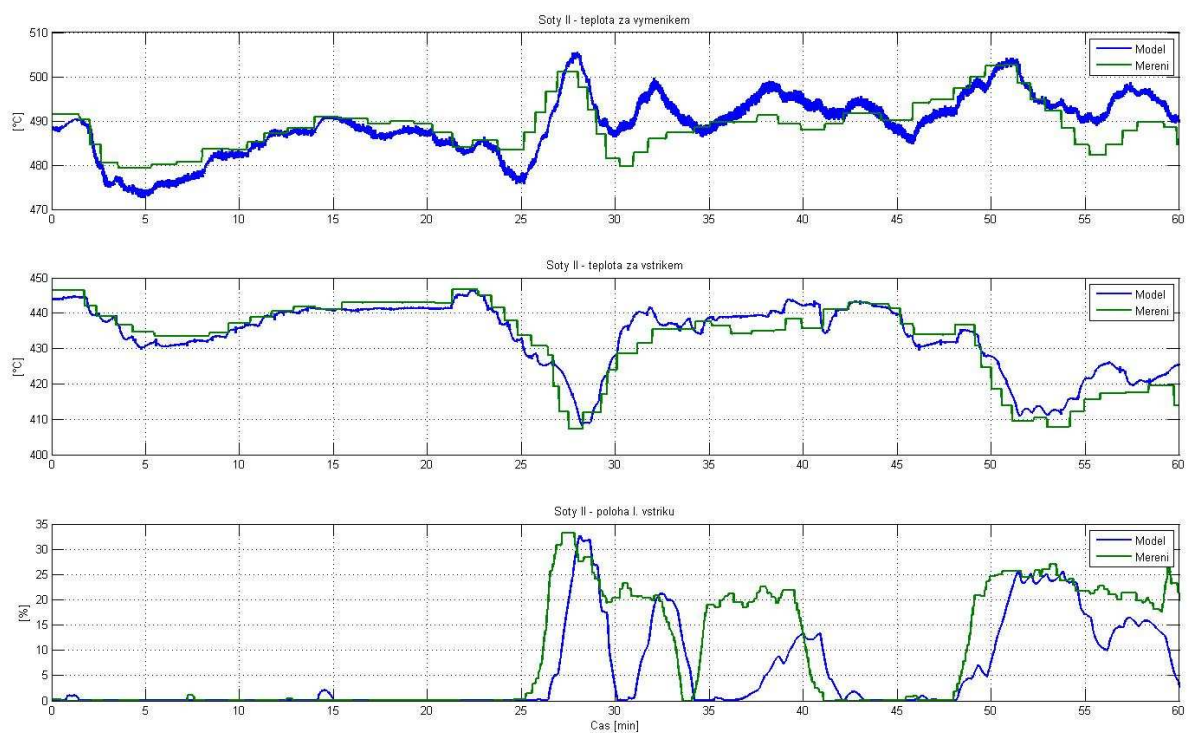


Obr. 3.11: Rozdělení měření na patnáct úseků A až O znázorněné na průběhu žádaného výkonu

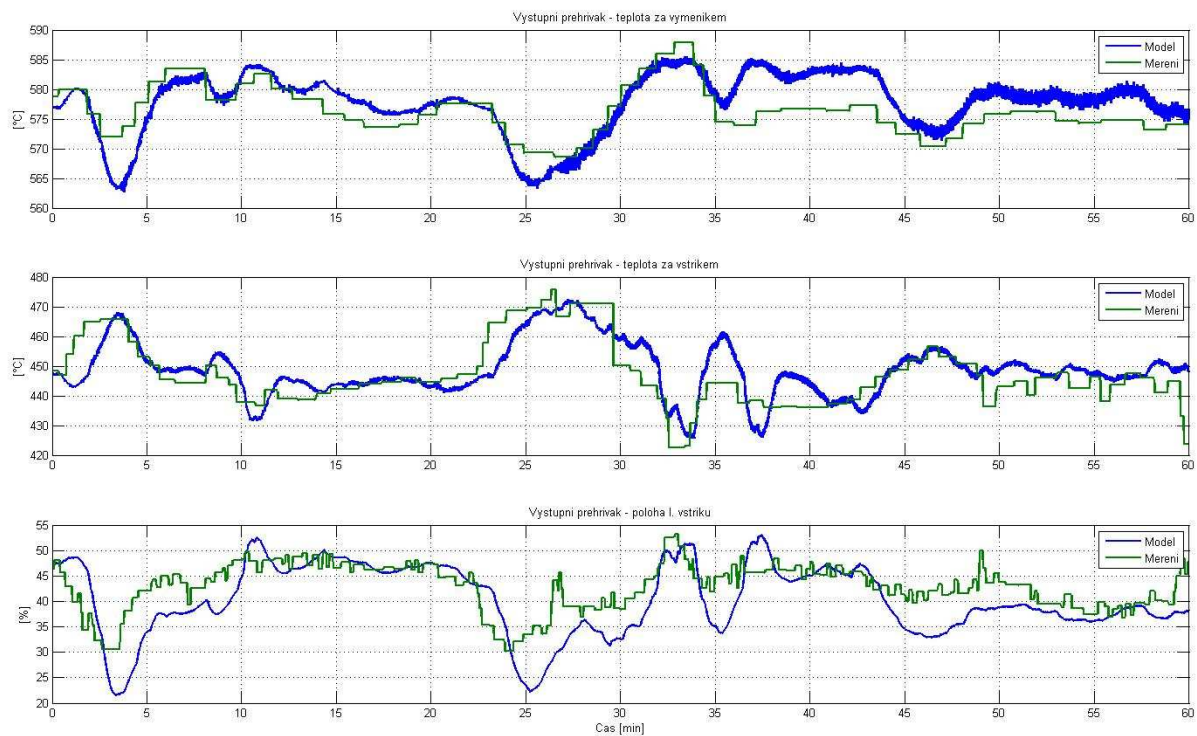
3.3 Verifikace v úseku A



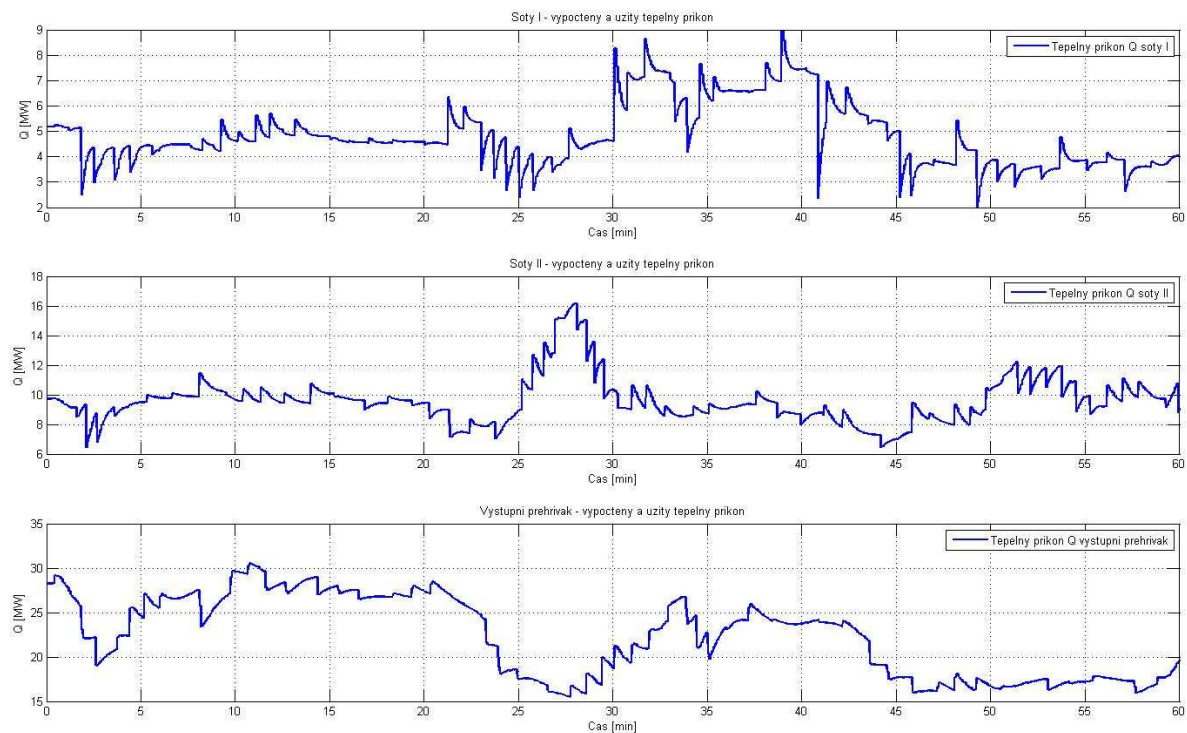
Obr. 3.12: Porovnání modelu a měření v úseku A (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



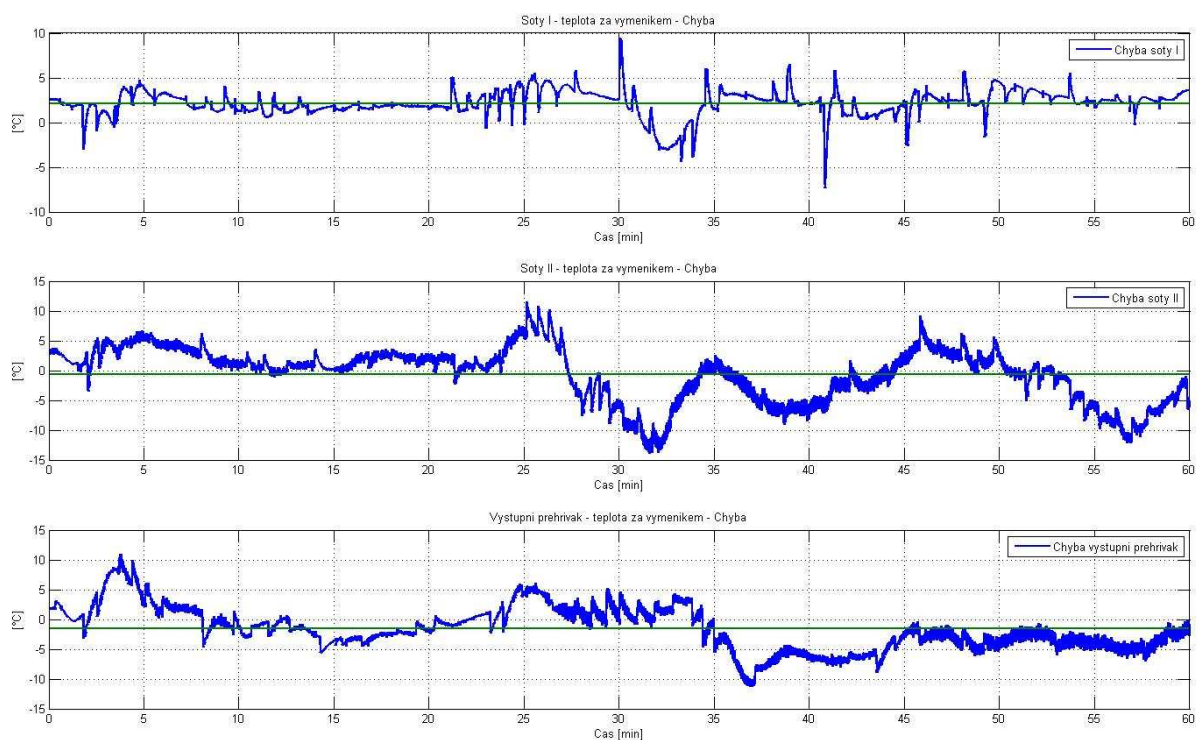
Obr. 3.13: Porovnání modelu a měření v úseku A (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 3.14: Porovnání modelu a měření v úseku A (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 3.15: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku A s odhadem střední hodnoty

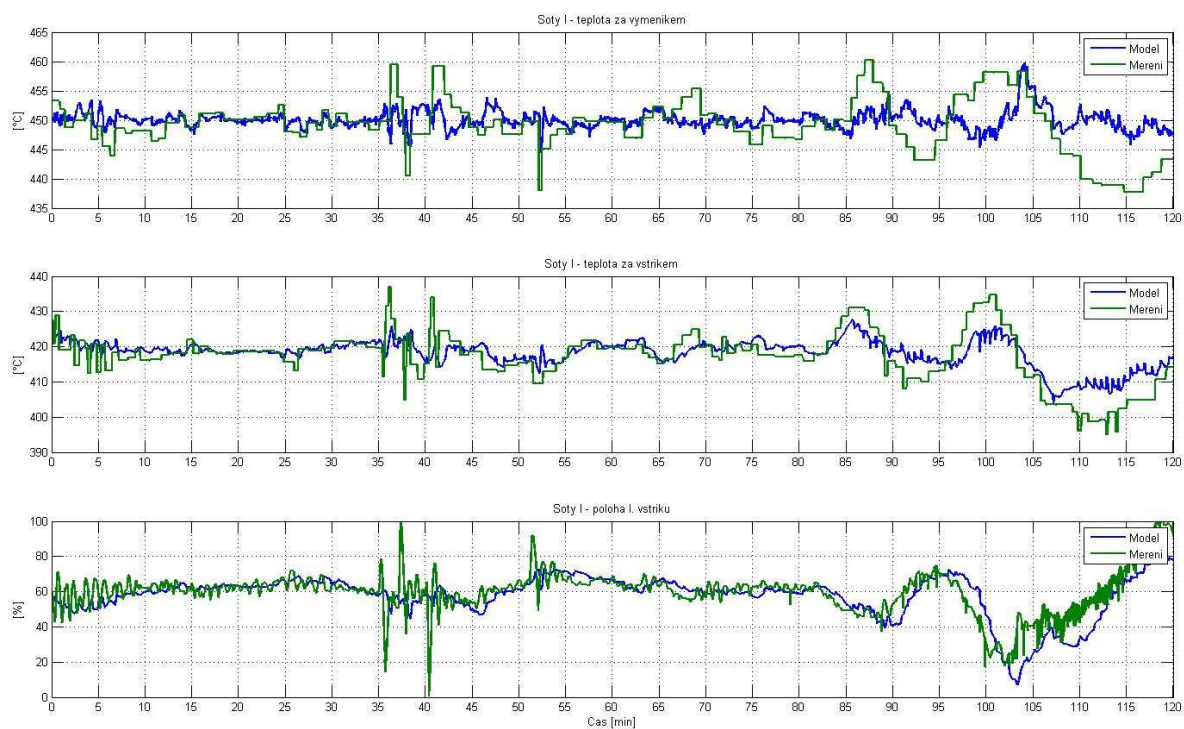


Obr. 3.16: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku A s odhadem střední hodnoty

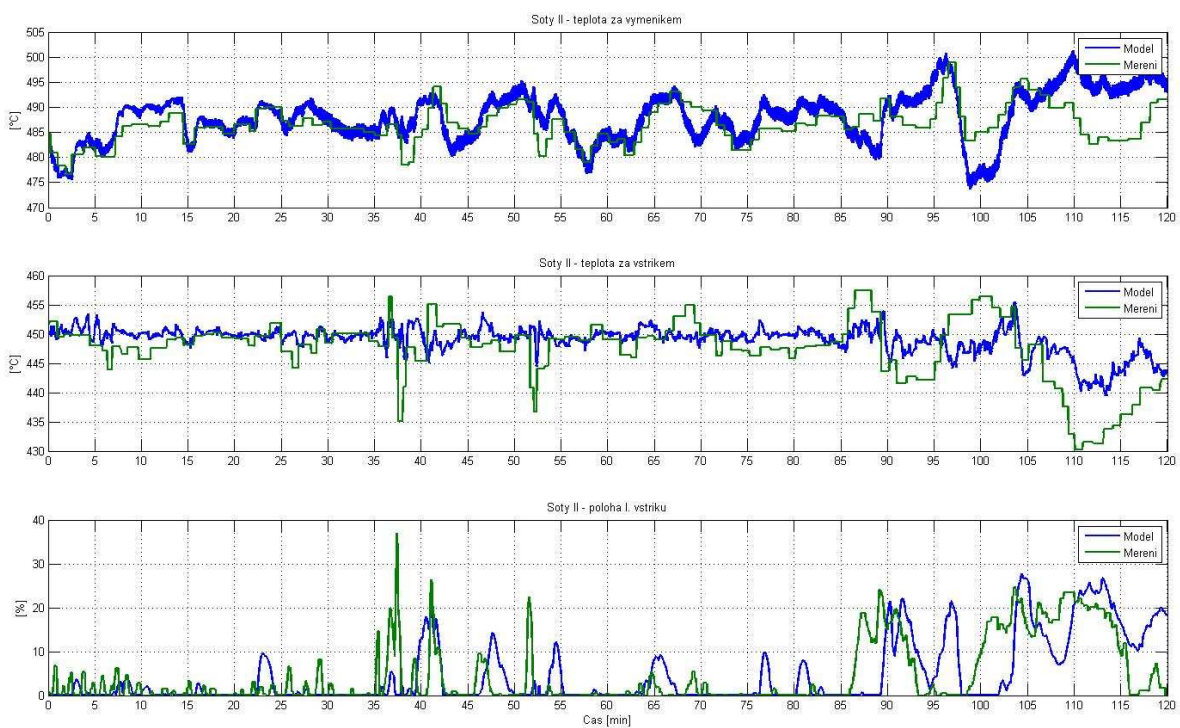
Tab. 3.2: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku A

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	8,64E+04	4,869	436,078	2,135	9,382	0,002	2,363	1,537
Šoty II	2,64E+05	9,456	489,216	-0,653	13,892	5,39E-05	20,710	4,551
Výstupní přehřívák	1,94E+05	22,378	577,887	-1,545	11,284	2,19E-04	13,141	3,625

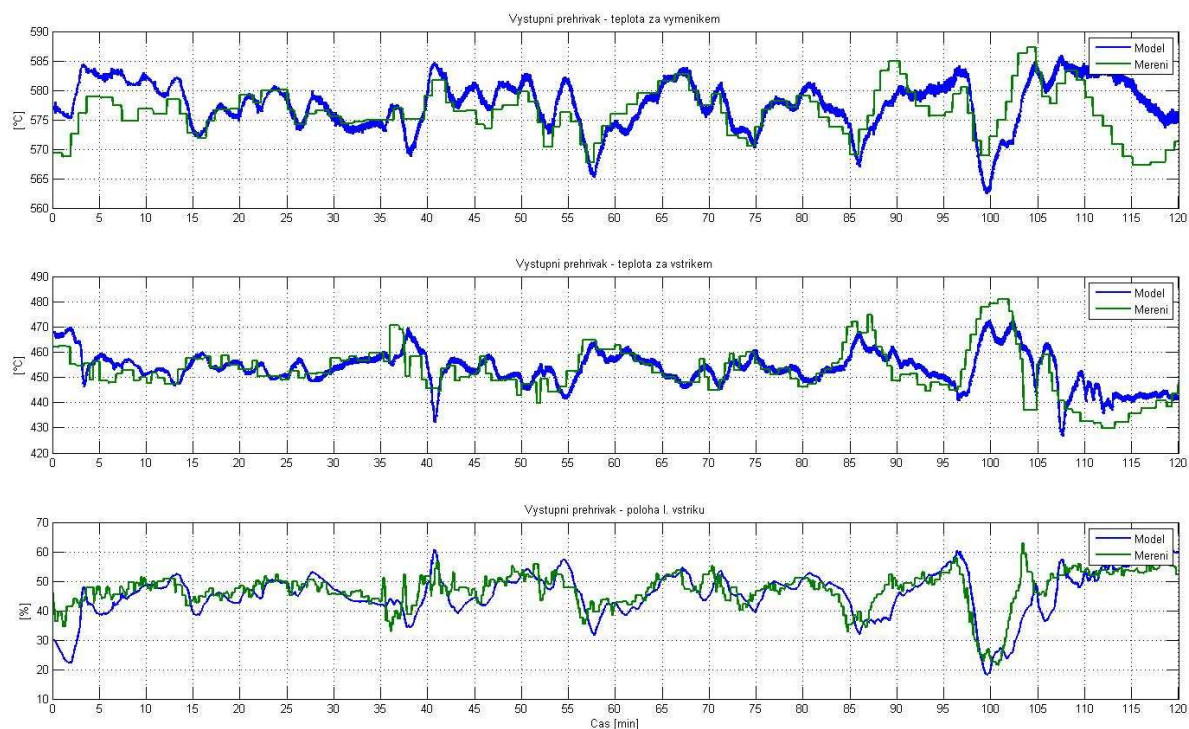
3.4 Verifikace v úseku B



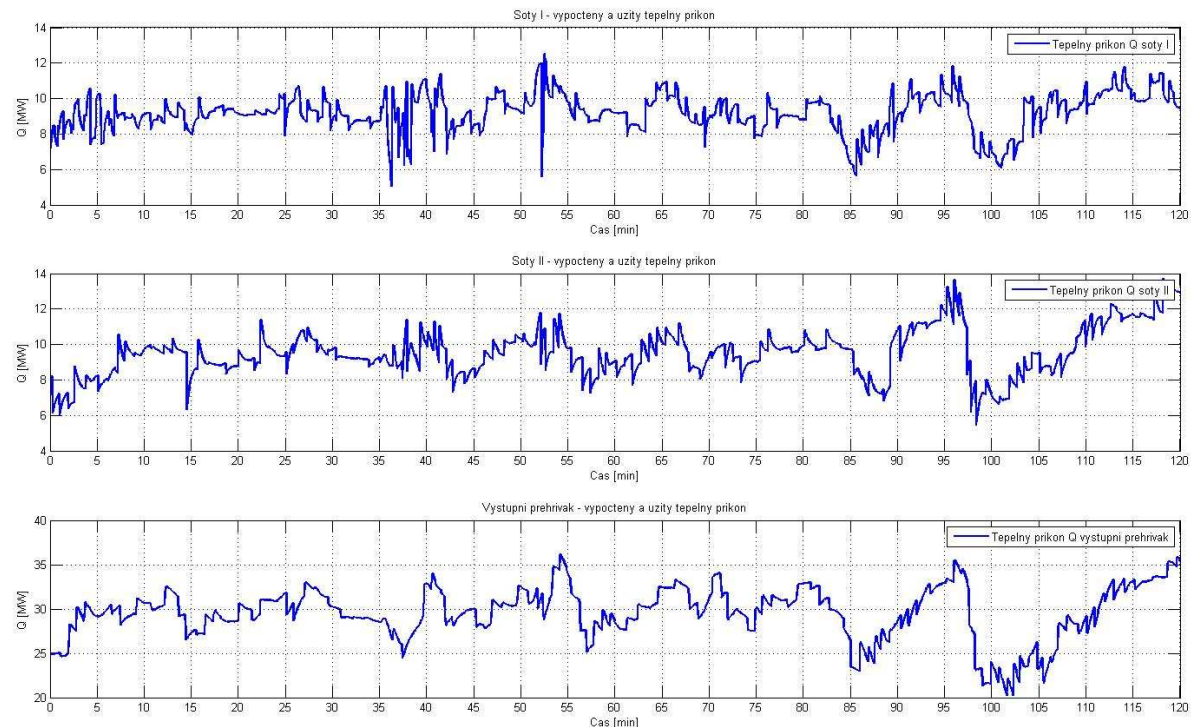
Obr. 3.17: Porovnání modelu a měření v úseku B (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



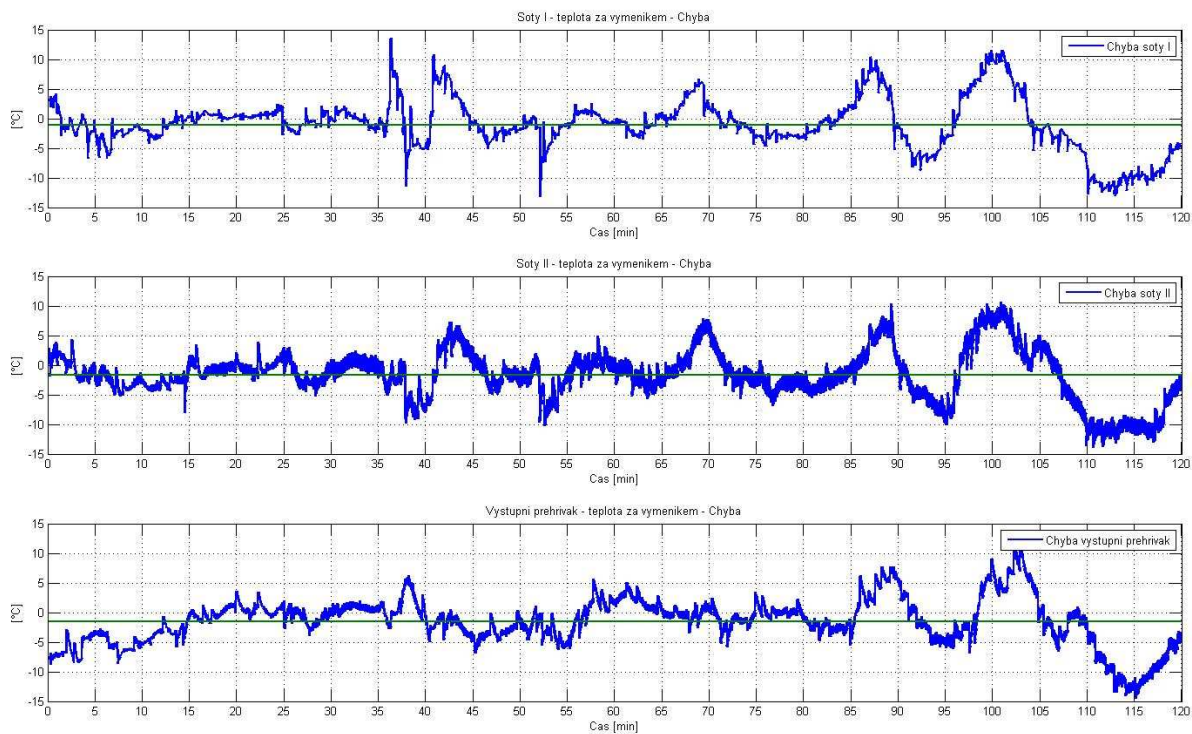
Obr. 3.18: Porovnání modelu a měření v úseku B (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 3.19: Porovnání modelu a měření v úseku B (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 3.20: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku B s odhadem střední hodnoty

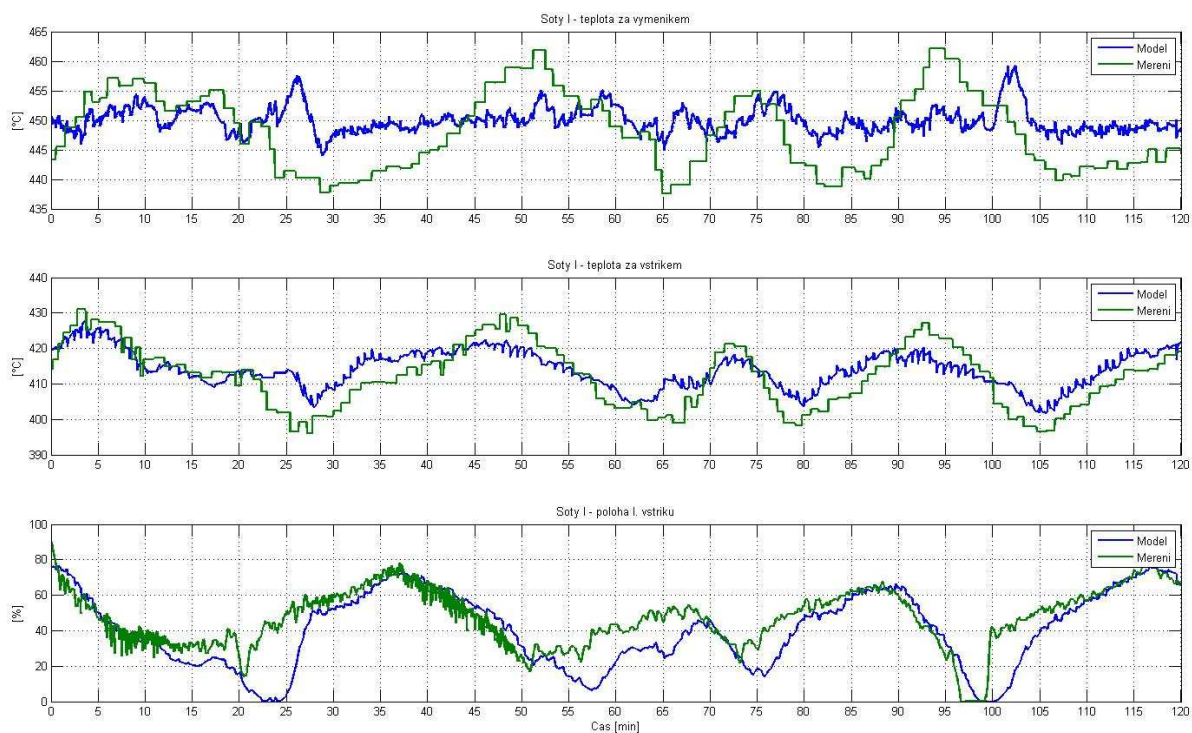


Obr. 3.21: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku B s odhadem střední hodnoty

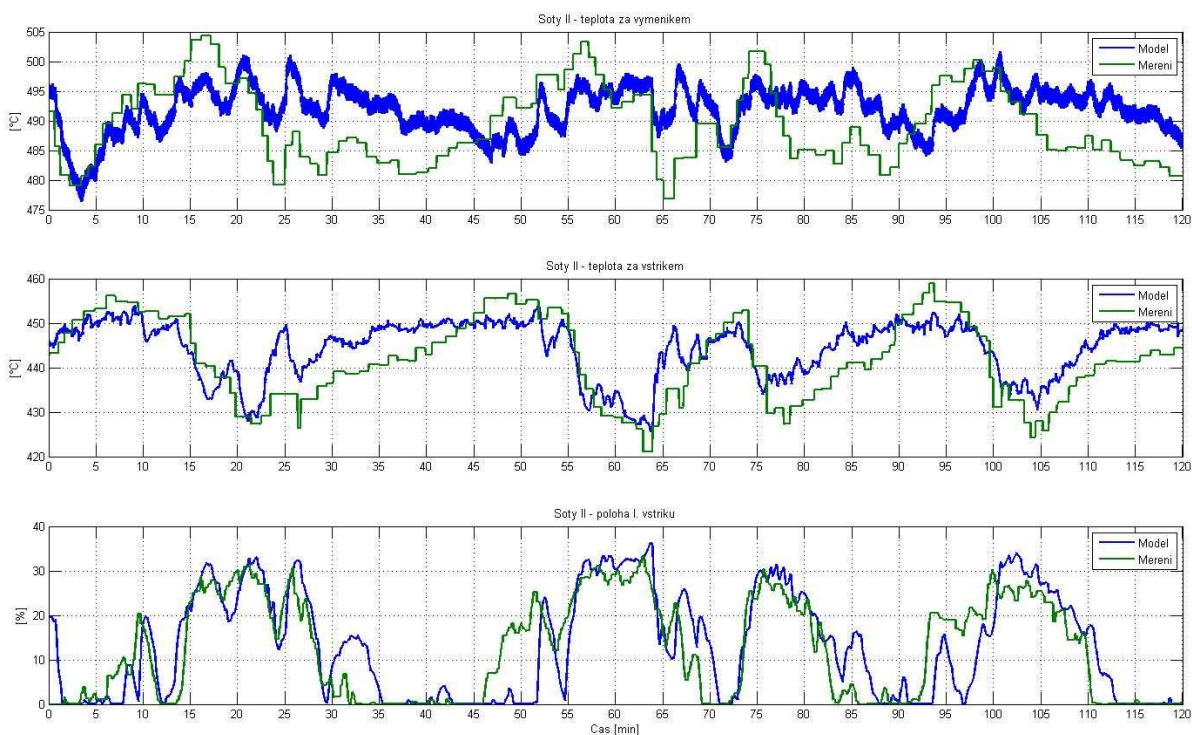
Tab. 3.3: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku B

	$J [^{\circ}C^2]$	$Q_{str} [MW]$	$T_{str} [^{\circ}C]$	$E_{str} [^{\circ}C]$	$E_{max} [^{\circ}C]$	$E_{min} [^{\circ}C]$	$E_{var} [^{\circ}C^2]$	$E_{std} [^{\circ}C]$
Šoty I	5,36E+05	9,177	450,055	-1,105	13,613	2,10E-04	18,896	4,347
Šoty II	5,50E+05	9,515	488,107	-1,716	13,960	9,64E-05	17,711	4,208
Výstupní přehřívák	4,90E+05	29,519	577,753	-1,541	14,417	2,36E-04	16,008	4,001

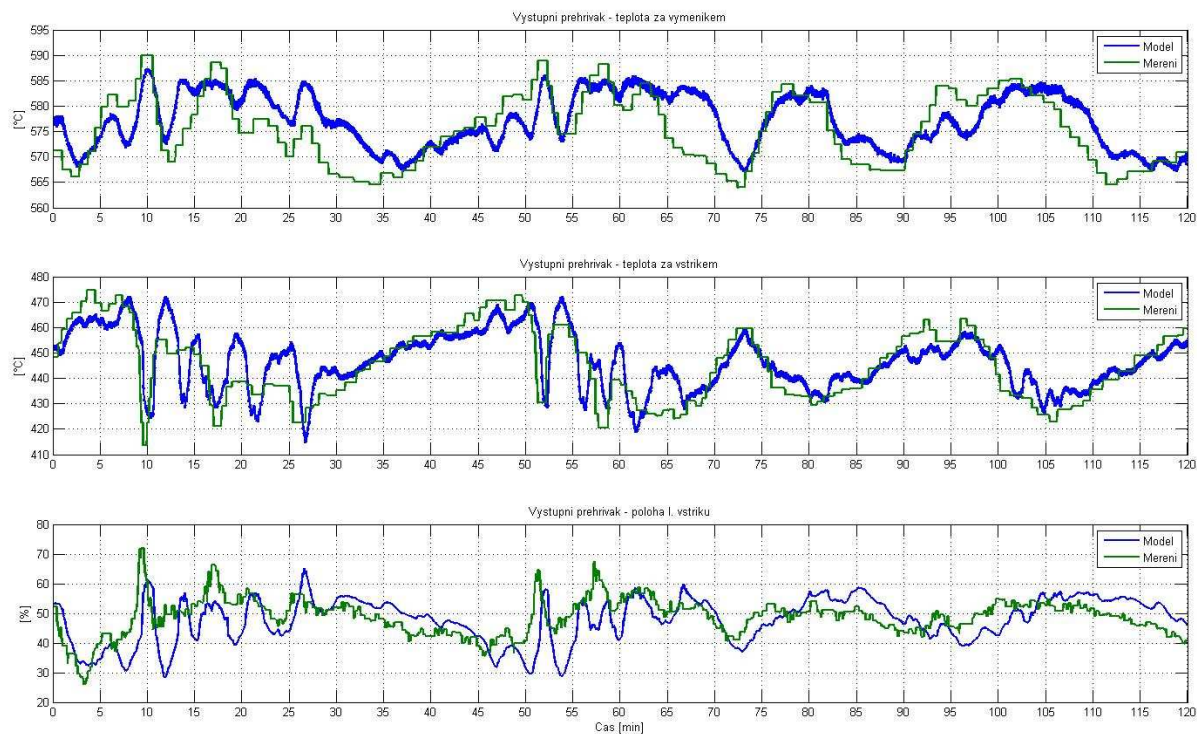
3.5 Verifikace v úseku C



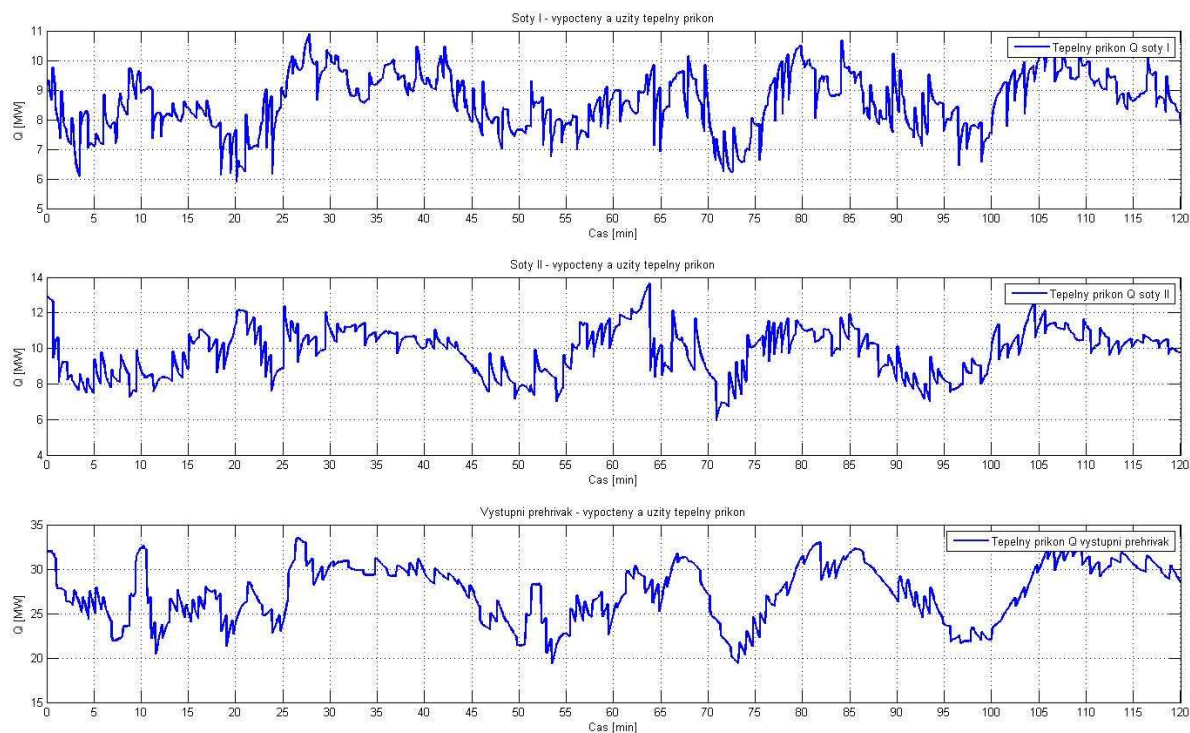
Obr. 3.22: Porovnání modelu a měření v úseku C (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



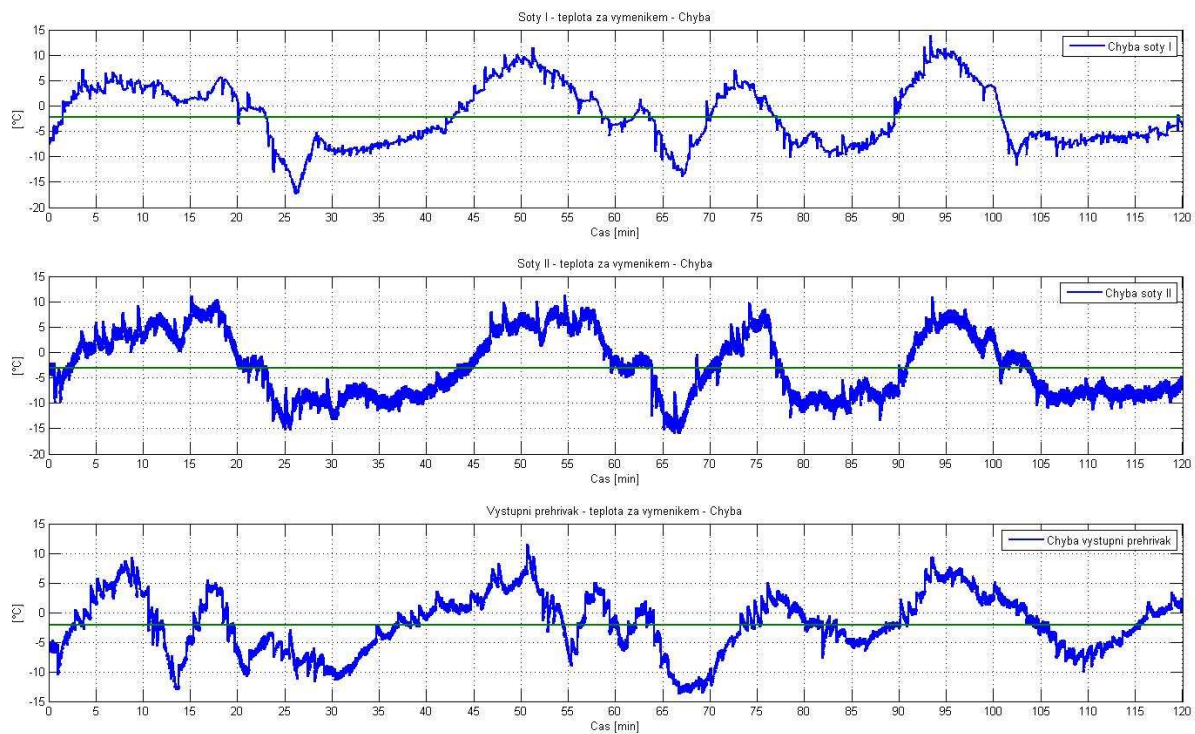
Obr. 3.23: Porovnání modelu a měření v úseku C (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 3.24: Porovnání modelu a měření v úseku C (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstříkem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 3.25: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku C s odhadem střední hodnoty

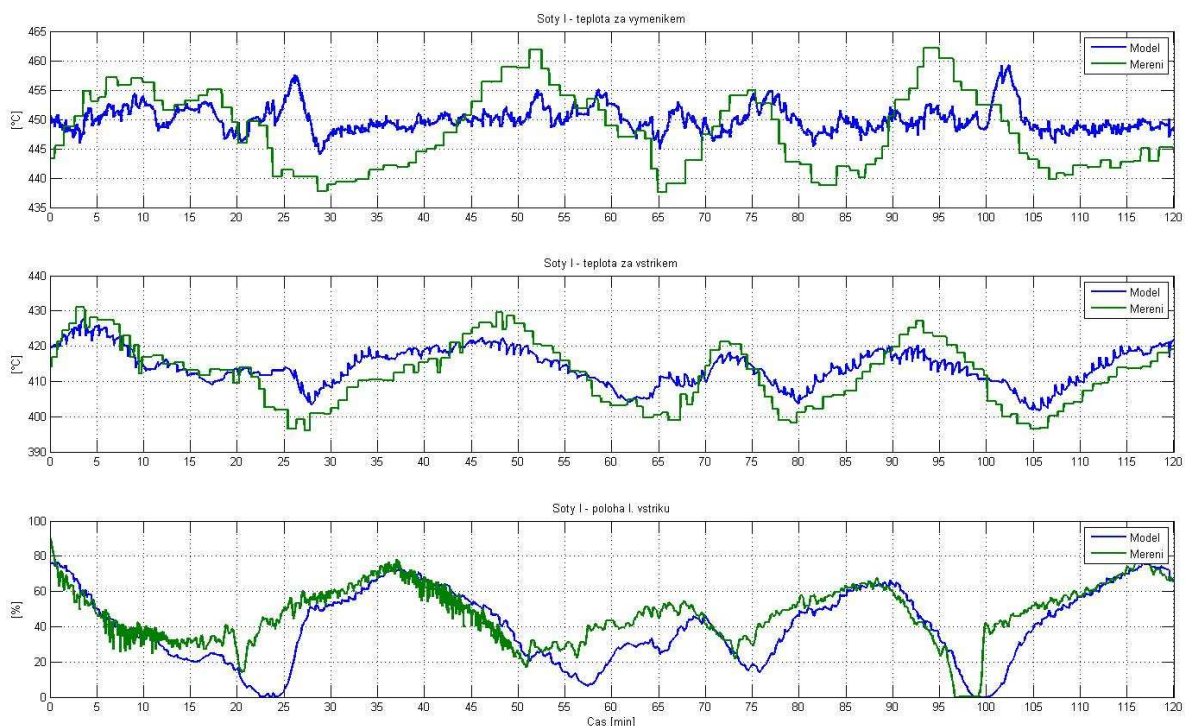


Obr. 3.26: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku C s odhadem střední hodnoty

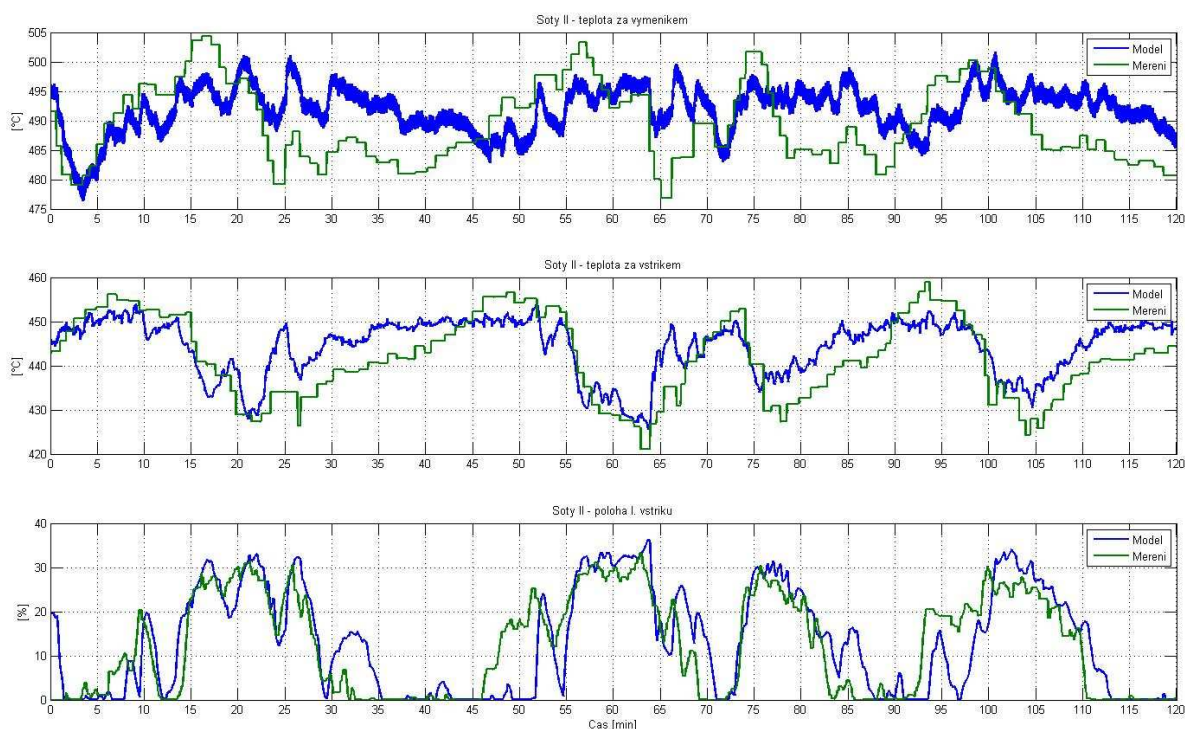
Tab. 3.4: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku C

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	1,12E+06	8,629	449,967	-2,262	17,419	1,40E-03	35,860	5,988
Šoty II	1,35E+06	9,858	492,022	-3,074	16,007	2,21E-04	39,869	6,314
Výstupní přehřívák	7,90E+05	27,487	577,139	-2,111	13,818	3,62E-05	24,367	4,936

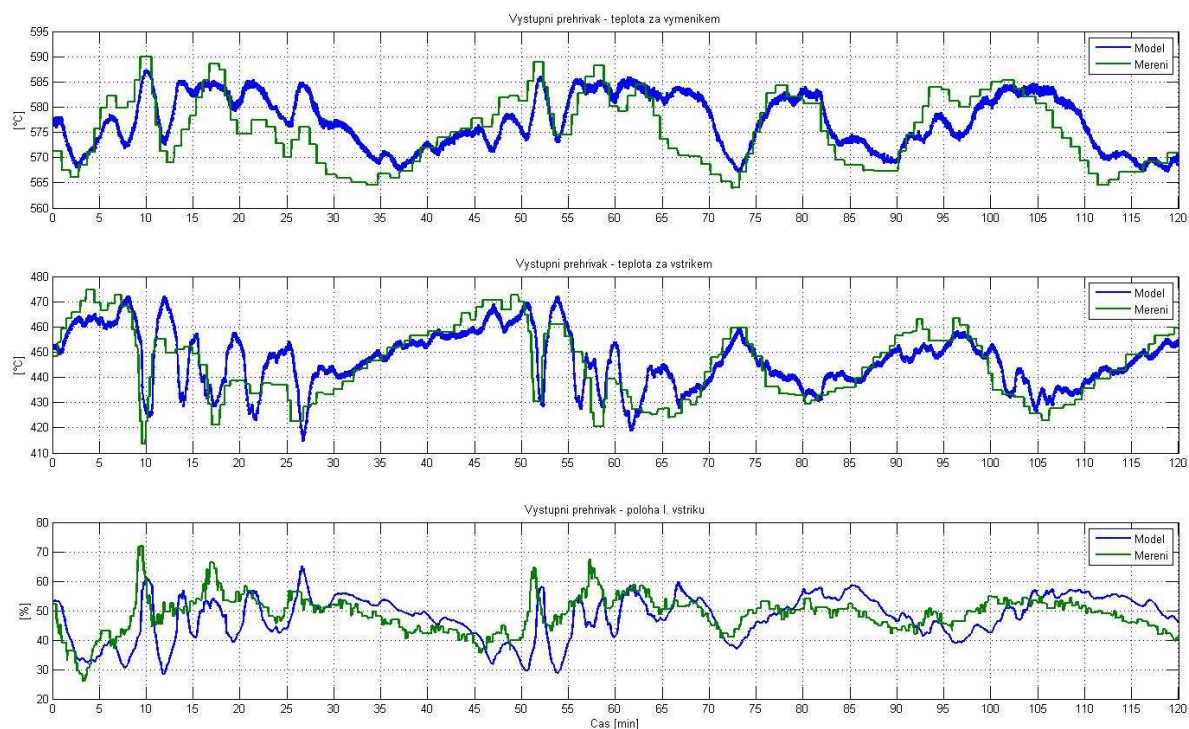
3.6 Verifikace v úseku D



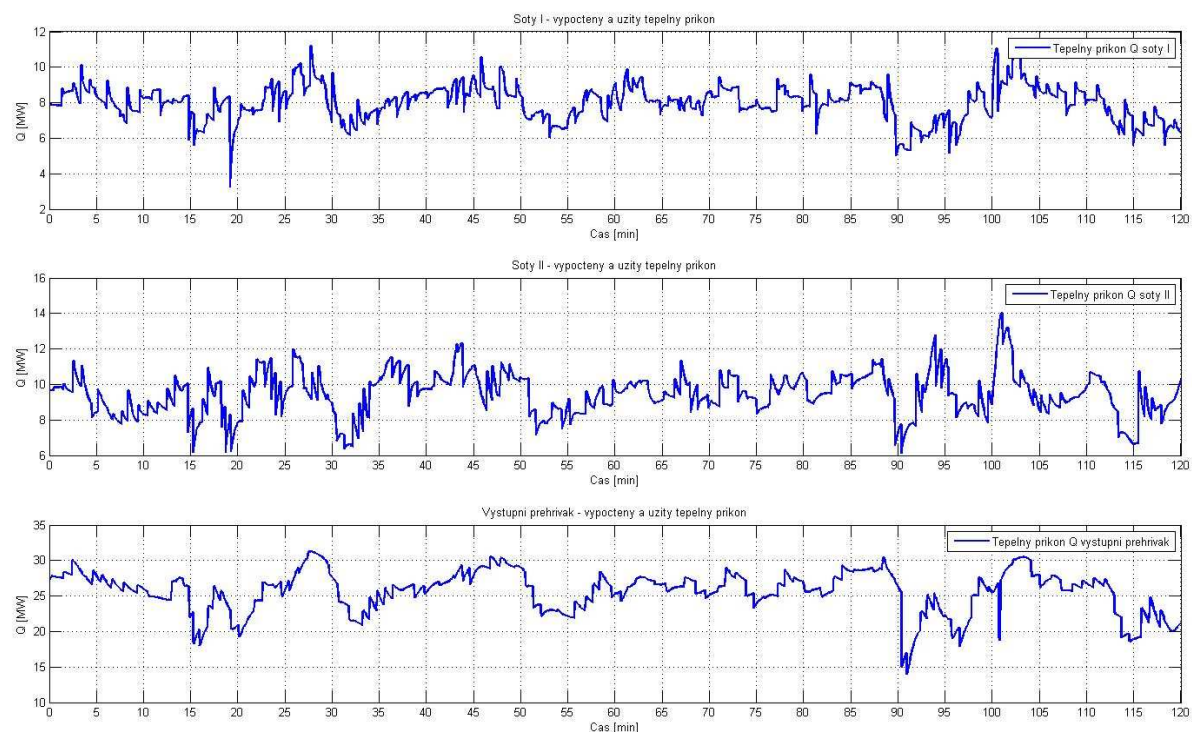
Obr. 3.27: Porovnání modelu a měření v úseku D (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



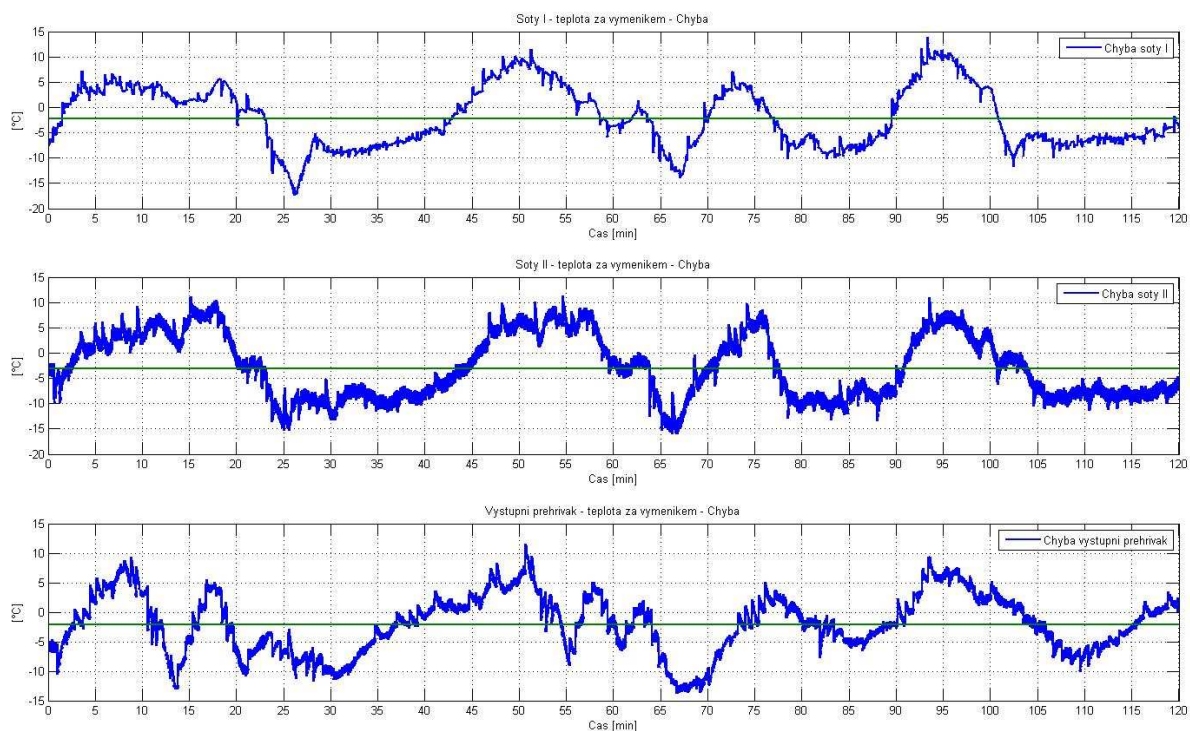
Obr. 3.28: Porovnání modelu a měření v úseku D (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 3.29: Porovnání modelu a měření v úseku D (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 3.30: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku D s odhadem střední hodnoty

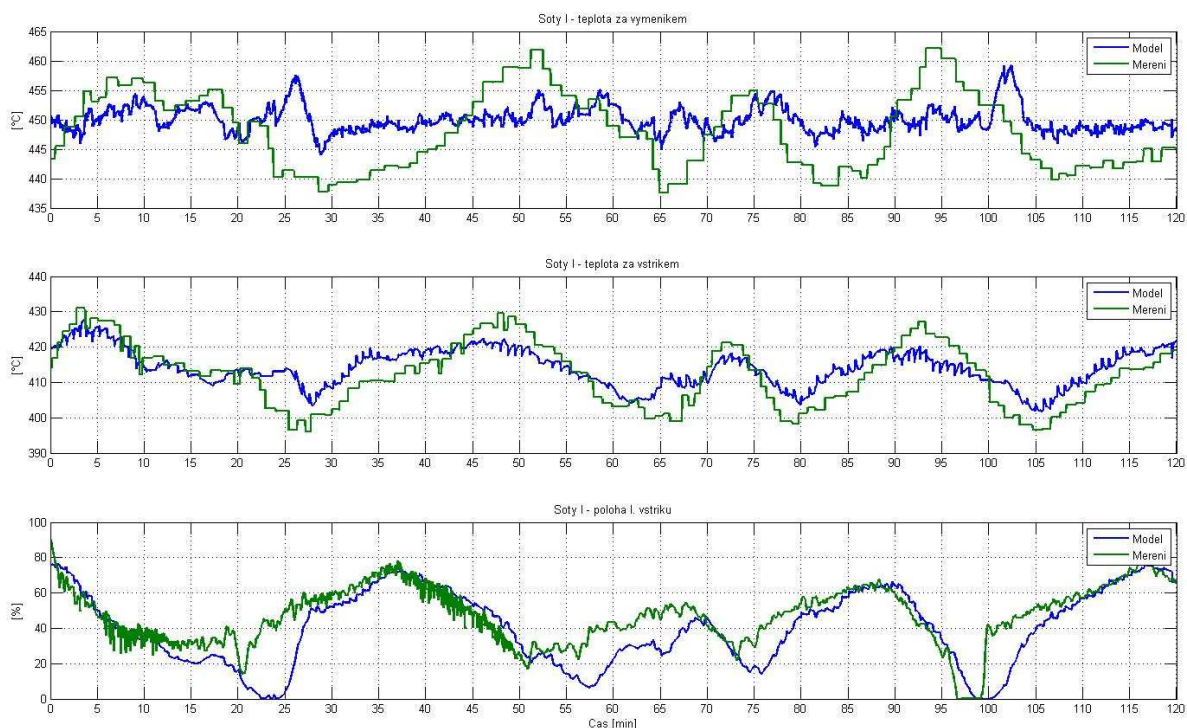


Obr. 3.31: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku D s odhadem střední hodnoty

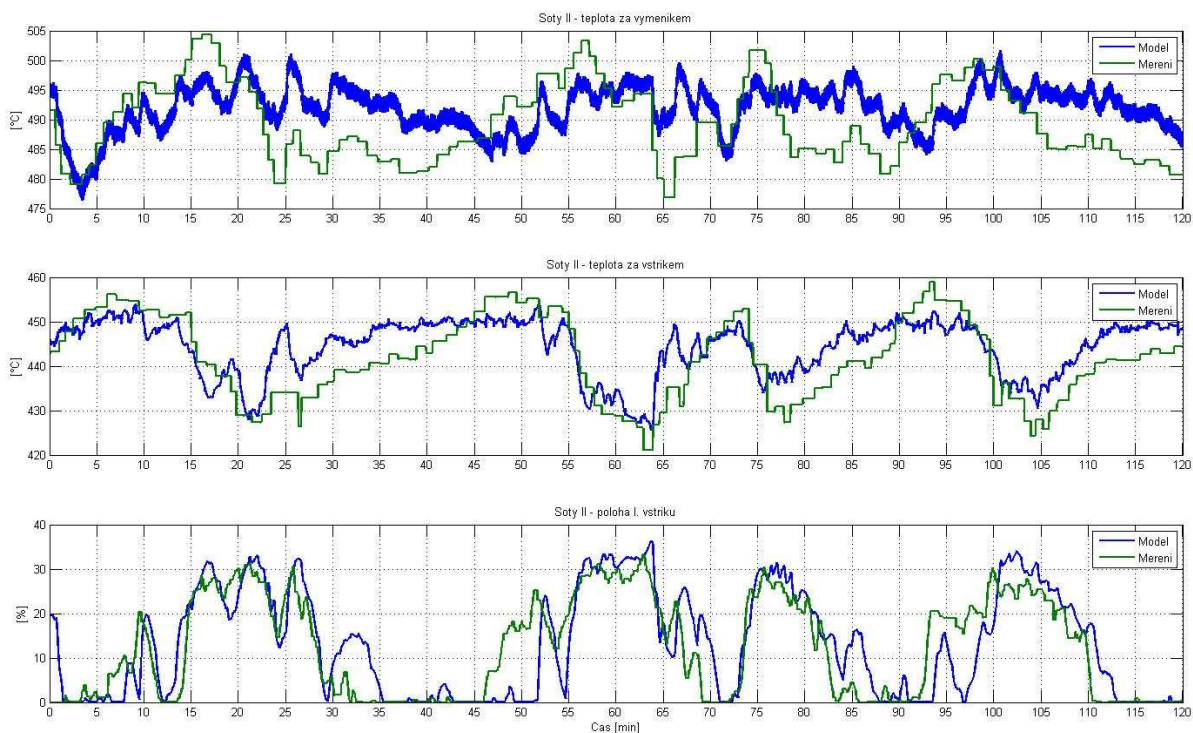
Tab. 3.5: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku D

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	6,37E+05	8,000	450,162	0,205	13,643	5,58E-05	22,909	4,786
Šoty II	7,50E+05	9,456	493,323	0,309	15,808	1,93E-05	26,913	5,188
Výstupní přehřívák	3,33E+05	25,635	577,892	-0,956	13,524	8,22E-05	11,085	3,330

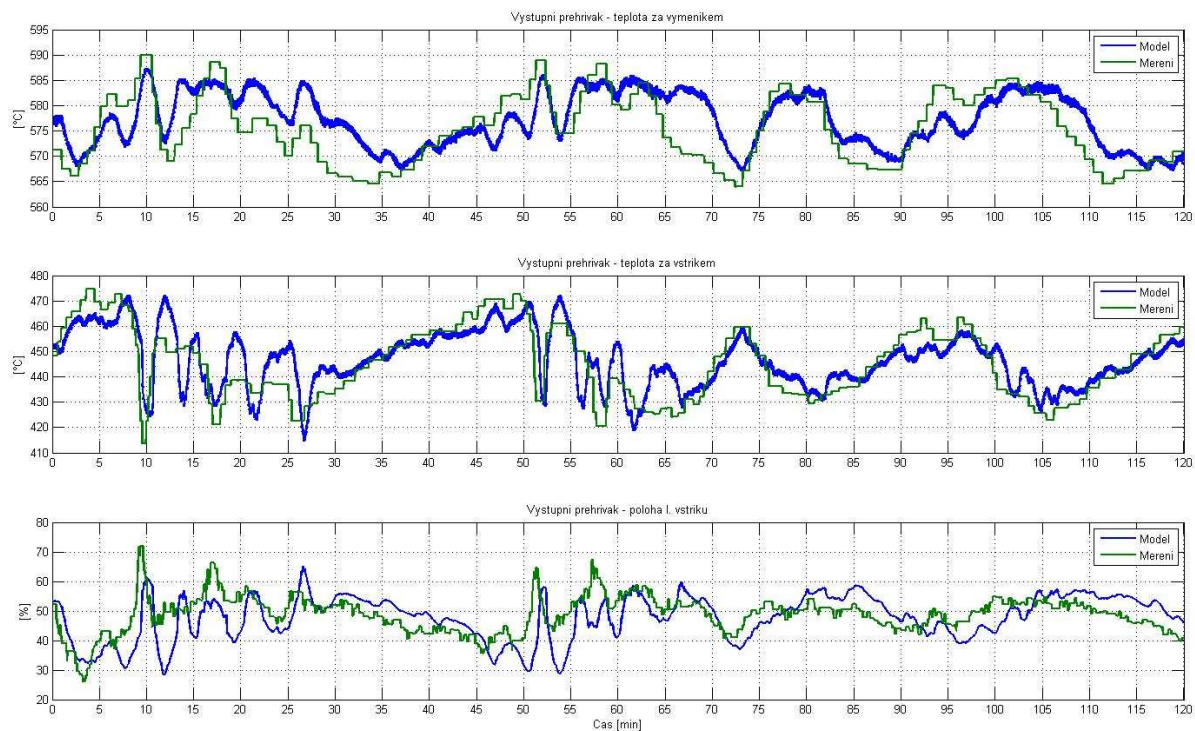
3.7 Verifikace v úseku E



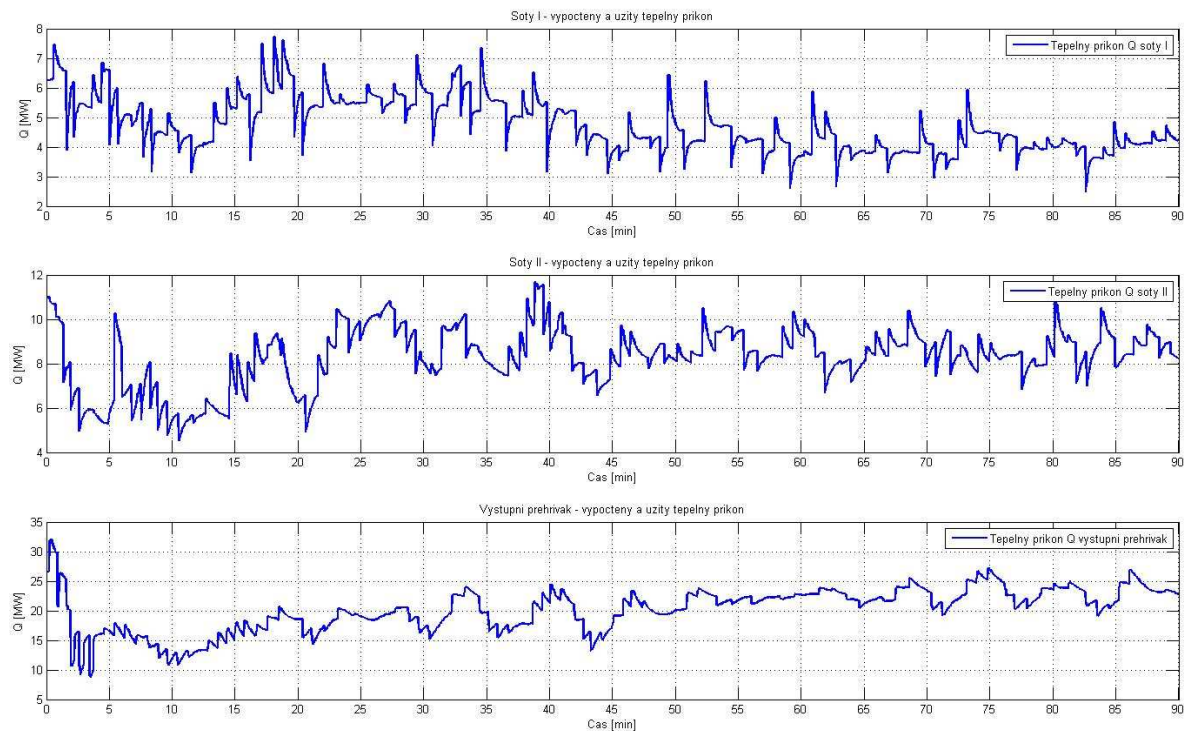
Obr. 3.32: Porovnání modelu a měření v úseku E (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



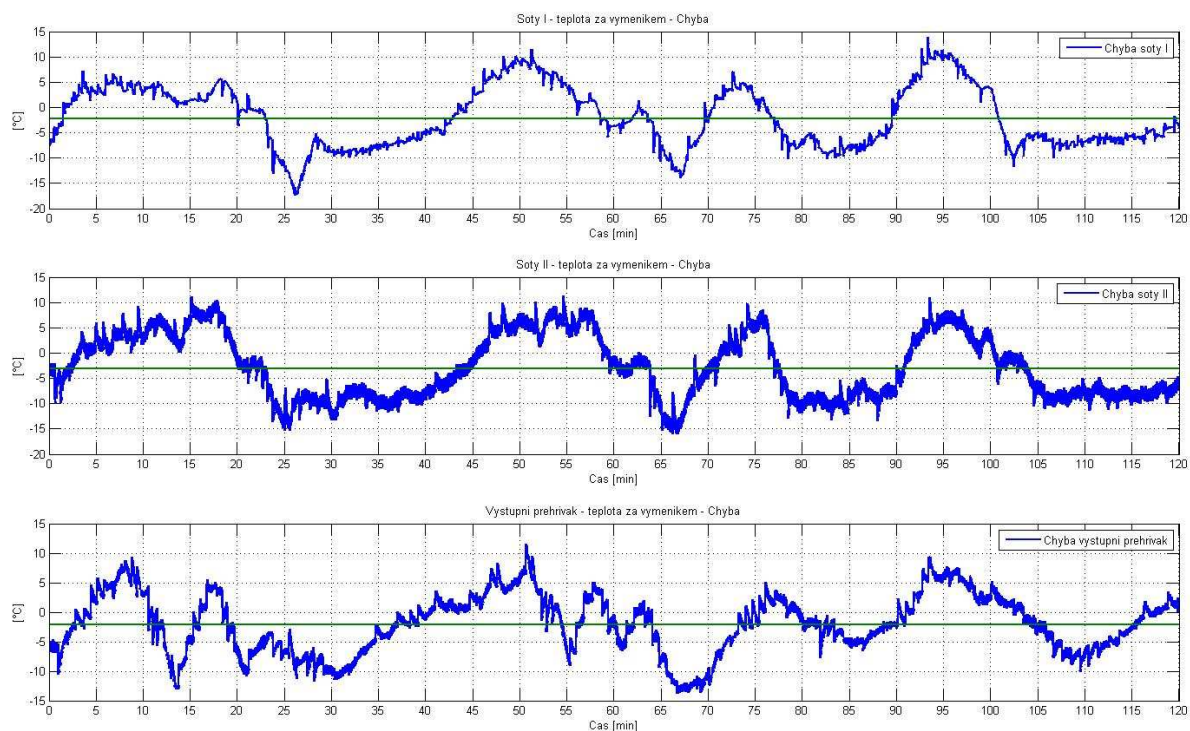
Obr. 3.33: Porovnání modelu a měření v úseku E (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 3.34: Porovnání modelu a měření v úseku E (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 3.35: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku E s odhadem střední hodnoty



Obr. 3.36: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku E s odhadem střední hodnoty

Tab. 3.6: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku E

	$J [^{\circ}C^2]$	$Q_{str} [MW]$	$T_{str} [^{\circ}C]$	$E_{str} [^{\circ}C]$	$E_{max} [^{\circ}C]$	$E_{min} [^{\circ}C]$	$E_{var} [^{\circ}C^2]$	$E_{std} [^{\circ}C]$
Šoty I	1,26E+05	4,709	436,882	2,199	8,567	8,46E-04	2,303	1,518
Šoty II	2,39E+05	8,254	490,576	0,586	14,705	2,53E-04	13,230	3,637
Výstupní přehřívák	5,67E+05	20,033	576,464	-1,267	23,823	1,24E-04	30,574	5,529

3.8 Vyhodnocení verifikace

Po provedení všech simulací a vypočtení potřebných parametrů jsem mohl posoudit shodu modelu s chováním reálné soustavy vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny. V tabulce 3.7, 3.8 a 3.9 jsou uvedeny maximální a minimální hodnoty všech parametrů, které kvantifikují rozdíl mezi modelem a měřením. Uvedené hodnoty jsou určeny ze všech úseků měření A až O, tzn. z celého dostupného měření.

Nejzajímavějším parametrem, který kvantifikuje rozdíl mezi modelem a chováním reálné soustavy, je maximální chyba teploty páry za výměníky E_{max} . Pro výměník šoty I se tato chyba pohybuje v intervalu od 4,99 °C do 20,40 °C, pro výměník šoty II v intervalu od 6,59 °C do 19,36 °C a pro výstupní přehřívač od 6,71 °C do 23,82 °C. Pokud vezmu v úvahu nejhorší možné případy a vztáhnou je relativně k žádaným hodnotám teploty páry na výstupu výměníků (šoty I – 460 °C, šoty II – 485 °C, výstupní přehřívač – 575 °C), dostanu poměrně malé hodnoty v procentech (tab. 3.10). V případě výměníku šoty I je nejhorší možná chyba 4,44 % a průměrná nejhorší chyba 0,48 %. U výměníku šoty II je nejhorší možná chyba 3,99 % a průměrná nejhorší chyba -0,86 %. U výstupního přehřívače je nejhorší možná chyba 4,14 % a průměrná nejhorší chyba -0,53 %. Mohu tedy konstatovat, že v těchto extrémních případech je chyba modelu v řádu jednotek procent a shoda modelu s chováním reálné soustavy je velmi dobrá. Výběrová směrodatná odchylka E_{STD} a rozptyl E_{VAR} vyjadřují, jak moc jsou jednotlivé hodnoty chyby vzdáleny od jejich střední hodnoty.

Tab. 3.7: Maximální a minimální hodnoty rozdílu mezi modelem a měřením šoty I

	J [°C ²]	Q _{str} [MW]	T _{str} [°C]	E _{str} [°C]	E _{max} [°C]	E _{min} [°C]	E _{var} [°C ²]	E _{std} [°C]
Max	1,12E+06	9,18	450,16	2,20	20,40	2,00E-03	49,34	7,02
Min	2,54E+04	4,71	436,08	-2,61	4,99	2,08E-06	1,01	1,00

Tab. 3.8: Maximální a minimální hodnoty rozdílu mezi modelem a měřením šoty II

	J [°C ²]	Q _{str} [MW]	T _{str} [°C]	E _{str} [°C]	E _{max} [°C]	E _{min} [°C]	E _{var} [°C ²]	E _{std} [°C]
Max	1,35E+06	10,57	494,42	0,59	19,36	8,68E-04	61,56	7,85
Min	5,29E+04	7,55	486,81	-4,15	6,59	6,02E-06	1,51	1,23

Tab. 3.9: Maximální a minimální hodnoty rozdílu mezi modelem a měřením výstupního přehřívače

	J [°C ²]	Q _{str} [MW]	T _{str} [°C]	E _{str} [°C]	E _{max} [°C]	E _{min} [°C]	E _{var} [°C ²]	E _{std} [°C]
Max	7,90E+05	30,27	577,89	-0,11	23,82	8,42E-04	32,98	5,74
Min	4,23E+04	20,03	575,94	-3,06	6,71	5,58E-06	1,61	1,27

Tab. 3.10: Relativní chyba vztažená k žádané hodnotě teploty páry za výměníky

	šoty I			šoty II			výstupní přehřívák		
	E _{str} [%]	E _{max} [%]	E _{min} [%]	E _{str} [%]	E _{max} [%]	E _{min} [%]	E _{str} [%]	E _{max} [%]	E _{min} [%]
Max	0,48	4,44	4,35E-04	0,12	3,99	1,79E-04	-0,02	4,14	1,46E-04
Min	-0,57	1,08	4,52E-07	-0,86	1,36	1,24E-06	-0,53	1,17	9,70E-07

Z kvadratického kritéria J je patrné, že rozdíl modelu a soustavy je přibližně ve stejném intervalu u všech výměníků a nepřesahuje hodnotu $1,35 \cdot 10^6$. Znamená to také, že model vystihuje chování soustavy na všech výkonových hladinách přibližně stejně a výrazně nevybočuje pro libovolný úsek měření a uvažovaný typ výměníku. Velmi dobrou vizuální shodu modelu a měření můžeme vidět např. v úseku B (obr. 3.17, 3.19).

Dalším zajímavým ukazatelem je průměrná teplota páry na výstupu u všech výměníků. Průměrná teplota páry na výstupu z výměníku šoty I a šoty II je posunutá oproti žádané hodnotě. U výměníku šoty I je žádaná hodnota 460 °C, ale průměrná teplota na výstupu z modelu se pohybuje v intervalu od 436,08 °C do 450,16 °C. Tento rozdíl cca 10 °C lze pozorovat i u měření na reálné soustavě, kde střední hodnota teploty páry za výměníkem šoty I je 445,78 °C. Stejně tomu je i u výměníku šoty II, kde se teplota páry na výstupu z modelu pohybuje v intervalu od 486,81 °C do 494,42 °C, přičemž žádaná hodnota činí 485 °C a průměrná teplota páry měřená na reálné soustavě je 489,52 °C. U výstupního přehříváku je naopak žádaná hodnota 575 °C shodná se střední hodnotou teploty páry měřené na reálné soustavě 575,78 °C a tomu odpovídá i interval na výstupu z modelu v mezích od 575,94 °C do 577,89 °C. Model se tedy neliší svým chováním oproti naměřeným hodnotám, ale je to pouze informace o tom, že na reálné technologii nemusí být regulační pochod nastaven tak, aby dosáhl přesně požadované teploty páry u výměníku šoty I a šoty II, nebo byly nastaveny jiné žádané hodnoty, než dle předpokladu.

Abych si udělal představu, v jakých mezích se pohybují hodnoty dodaného tepelného příkonu generovaného zpětnovazební strukturou, uvedl jsem v tabulce 3.7 až 3.9 interval jeho středních hodnot. U výměníku šoty I a šoty II se velikost dodaného tepelného příkonu pohybuje do 10 MW. U výstupního přehříváku je to mezi 10 a 20 MW v závislosti na výkonové hladině.

Obecně mohu konstatovat, že model vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny s tepelným příkonem generovaným zpětnovazební strukturou se shoduje s chováním reálné soustavy v řádu jednotek procent. Chování modelu je tedy totožné s chováním reálné soustavy a model může být použit pro návrh pokročilých regulačních algoritmů.

4 Identifikace soustavy na základě provozního měření

V této kapitole se věnuji možnostem induktivního přístupu tvorby modelu pro tepelnou elektrárnu Pruněrov II na základě provozního měření vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny Tušimice II. Jelikož mám k dispozici apriorní informace o této soustavě v podobě měření, nabízí se možnost hledat závislosti a vazby mezi měřenými vstupními veličinami a měřenou výstupní teplotou páry za výměníky pomocí identifikace.

Jak už bylo jednou řečeno, velikou nevýhodou těchto apriorních informací je, že neobsahují měření dodaného tepelného příkonu do všech výměníků. Pro potřeby identifikace použiji tepelný příkon generovaný zpětnovazební strukturou. Další nevýhodou je, že se jedná pouze o provozní měření, které nevzniklo z žádného cíleného experimentu pro identifikační účely. V tomto případě se tedy jedná o problém identifikace v uzavřené smyčce. Měření navíc obsahuje dlouhé trendové změny přes všechny výkonové hladiny, které nejsou pro stanovení dynamiky systému vhodné.

Identifikaci v uzavřené smyčce se věnují např. práce [4], [5], [6], [7], [8]. V mém případě vzniká problém s volbou vhodné metody, jelikož pracuji s vícerozměrovým systémem. Většina metod se totiž věnuje převážně problematice SISO systémů. Metody aplikované na vícerozměrové systémy, které jsem mohl nastudovat, jsou převážně určeny pro speciální struktury, nebo kladou na soustavu určité požadavky. Pokud však budu identifikovat naši soustavu na základě měření v úseku pro konstantní výkonovou hladinu a budu klást určité požadavky na použitý regulátor, mohu využít metody přímé identifikace bez přídavného signálu popsané v práci [4].

4.1 Metoda přímé identifikace bez přídavného signálu

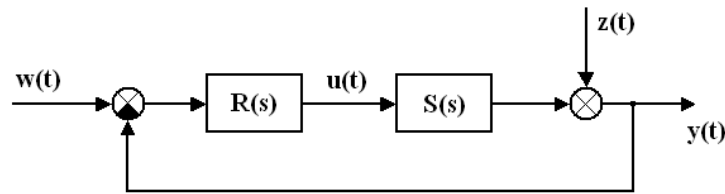
Při metodě přímé identifikace bez přídavného signálu se vychází z měření výstupu $y(t)$ a vstupu $u(t)$ identifikované soustavy (obr. 4.1) [4]. Žádaná hodnota $w(t)$ se uvažuje jako nulová a identifikovaná soustava je buzena pouze poruchou $z(t)$. Dále se kladou určité požadavky na řád regulátoru tak, aby se odstranila korelace mezi vstupem poruchy $z(t)$ a signálem vstupujícím do identifikované soustavy $u(t)$ vlivem zpětné vazby. Z rovnice 9 a 10 vyplývá podmínka pro řád čitatele regulátoru (rovnice 11) a řád jmenovatele regulátoru (rovnice 12), kde σ je řád čitatele regulátoru, μ je řád jmenovatele regulátoru, m_b je řád čitatele identifikované soustavy, m_a řád jmenovatele identifikované soustavy a d je dopravní zpoždění identifikované soustavy [4].

$$\max[\mu + m_a, \sigma + m_b + d] > m_a + m_b \quad (9)$$

$$\max[\mu - m_b, \sigma + d - m_a] \geq 0 \quad (10)$$

$$\sigma > \mu - d + m_a - m_b \Rightarrow \sigma \geq m_a - d \quad (11)$$

$$\sigma > \mu - d + m_a - m_b \Rightarrow \mu \geq m_b \quad (12)$$



Obr. 4.1: Princip přímé identifikace bez přídavného signálu v uzavřeném regulačním obvodu

Pokud vyjádříme přenos mezi poruchou $Z(s)$ a výstupem $Y(s)$ dostaneme rovnici 13:

$$\frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{1}{1 + R(s) \cdot S(s)} = \frac{1}{1 + \frac{R_B(s) \cdot S_B(s)}{R_A(s) \cdot S_A(s)}} = \frac{R_A(s) \cdot S_A(s)}{R_A(s) \cdot S_A(s) + R_B(s) \cdot S_B(s)} \quad (13)$$

Po úpravě dostaneme rovnici 14:

$$R_A(s) \cdot S_A(s) \cdot Y(s) + R_B(s) \cdot S_B(s) \cdot Y(s) = R_A(s) \cdot S_A(s) \cdot Z(s) \quad (14)$$

Jestliže uvažujeme $w(t) = 0$, potom platí $E(s) = -Y(s)$ a přenos mezi regulační odchylkou $E(s)$ a akční veličinou $U(s)$ lze vyjádřit rovnicí 15:

$$U(s) = -\frac{R_B(s)}{R_A(s)} \cdot Y(s) \quad (15)$$

Po úpravě rovnice 15 dostaneme rovnici 16:

$$Y(s) = -\frac{R_A(s)}{R_B(s)} \cdot U(s) \quad (16)$$

Dosadíme-li do rovnice 14 rovnici 16 dostaneme rovnici 17:

$$R_A(s) \cdot S_A(s) \cdot Y(s) - R_A(s) \cdot S_B(s) \cdot U(s) = R_A(s) \cdot S_A(s) \cdot Z(s) \quad (17)$$

Dále můžeme vykrátit jmenovatel regulátoru $R_A(s)$ a dostaneme rovnici 18:

$$S_A(s) \cdot Y(s) - S_B(s) \cdot U(s) = S_A(s) \cdot Z(s) \quad (18)$$

Po úpravě dostaneme rovnici 19, která odpovídá modelu OE:

$$Y(s) = \frac{S_B(s)}{S_A(s)} \cdot U(s) + Z(s) \quad (19)$$

Metoda přímé identifikace bez přídavného signálu po splnění zmíněných podmínek umožňuje identifikaci soustavy jako modelu OE v otevřené smyčce. V závislosti na uvažované dynamice poruchy se může jednat o jiné stochastické modely např. ARMAX.

Dále se mohou pokusit aplikovat metodu přímé identifikace bez přídavného signálu k identifikaci výměníků vysokotlaké části průtočného kotle. Pokud budu uvažovat úsek pro konstantní výkonovou hladinu bez působení poruchy, měly by regulátory v ideálním případě nastavit průtok a teplotu páry před výměníkem tak, aby na výstupu z výměníku byla žádaná teplota páry. Jestliže začne působit na soustavu porucha, např. v podobě změny dodaného tepelného příkonu, budou se regulátory snažit tuto poruchu potlačit. Systém bude v tomto případě buzený jenom poruchou. Jedná se tedy o stejný případ, jako předpokládá metoda přímé identifikace bez přídavného signálu s tím rozdílem, že žádaná hodnota není nulová, ale je to konstantní hodnota.

Jestliže uvažujeme $w(t) \neq 0$, potom platí $E(s) = W(s) - Y(s)$ a přenos mezi regulační odchylkou $E(s)$ a akční veličinou $U(s)$ lze vyjádřit rovnicí 20:

$$U(s) = \frac{R_B(s)}{R_A(s)} \cdot (W(s) - Y(s)) \quad (20)$$

Po vyjádření $Y(s)$ dostaneme rovnici 21:

$$Y(s) = -\frac{R_A(s)}{R_B(s)} \cdot U(s) + W(s) \quad (21)$$

Dosadíme-li do rovnice 14 rovnici 21 dostaneme rovnici 22:

$$R_A(s)S_A(s)Y(s) - R_A(s)S_B(s)U(s) + R_B(s)S_B(s)W(s) = R_A(s)S_A(s)Z(s) \quad (22)$$

Po úpravě dostaneme rovnici 23:

$$Y(s) = \frac{S_B(s)}{S_A(s)} \cdot U(s) + Z(s) + \frac{R_B(s)S_B(s)}{R_A(s)S_A(s)} \cdot W(s) \quad (23)$$

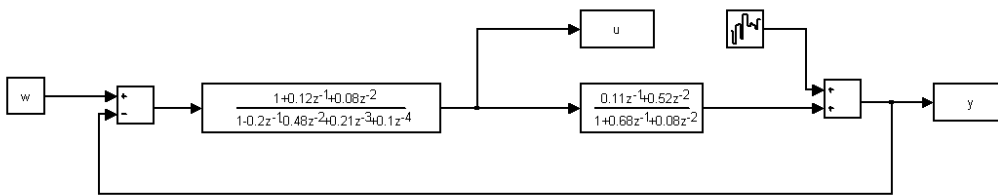
Pro konstantní žádanou hodnotu $W(s)$ a po odeznění přechodového děje bude metoda přímé identifikace bez přídavného signálu umožňovat identifikaci soustavy jako modelu OE v otevřené smyčce s posunutím rovnému statickému zesílení otevřené smyčky.

$$Y(s) = \frac{S_B(s)}{S_A(s)} \cdot U(s) + Z(s) + K_{L0} \quad (24)$$

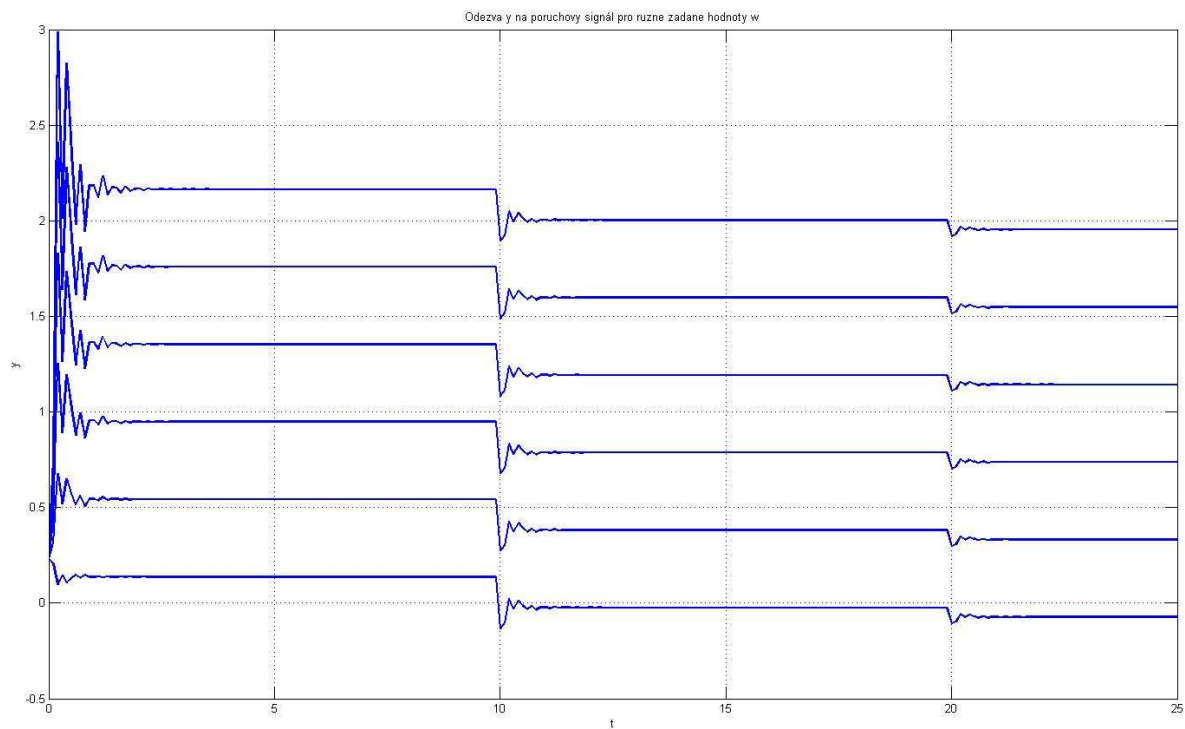
Tuto skutečnost mohou ověřit jednoduchým experimentem. Pro různé hodnoty $w(t)$, zobrazím průběhy $u(t)$ a $y(t)$, přičemž systém budu budit poruchovým signálem na výstupu. Pro tento účel použiji simulační zapojení (obr. 4.2) převzaté z [4]. Na obrázku 4.3 je vidět průběh výstupní veličiny $y(t)$ a na obrázku 4.4 průběh akční veličiny $u(t)$. Na obou obrázcích je vidět jak se počáteční průběh liší pro různé hodnoty $w(t)$. Po určitém čase odezní dynamika systému při skokové změně žádané hodnoty $w(t)$ a dále se průběhy buzené poruchovým signálem liší pouze posunutím o statické zesílení K_{yw} a K_{uw} . Tento rozdíl nebude při identifikaci dělat problémy, jelikož nepracujeme přímo se signálem $y(t)$ a $u(t)$, ale s $\Delta y(t)$ a $\Delta u(t)$ posunutým do pracovního bodu (vzorec 25 a 26).

$$\Delta y(t) = y(t) - y_0(t) \quad (25)$$

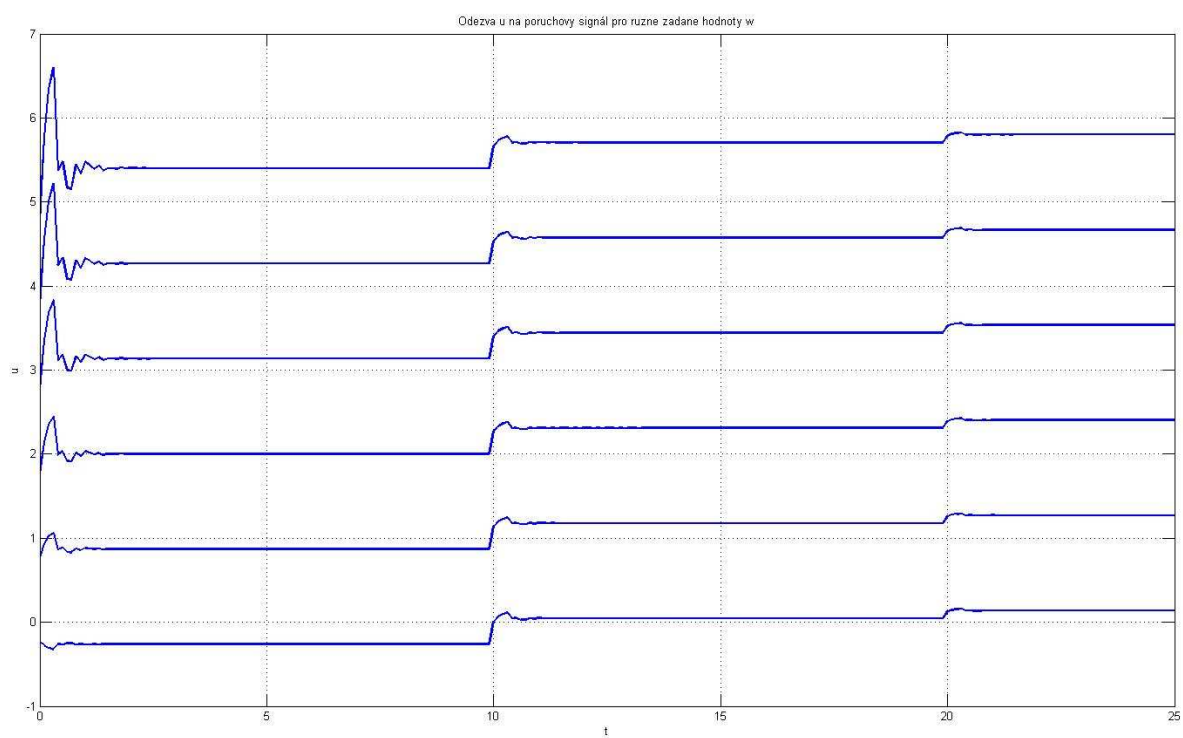
$$\Delta u(t) = u(t) - u_0(t) \quad (26)$$



Obr. 4.2: Schéma pro ověření metody přímé identifikace bez přídavného signálu pro různé hodnoty w

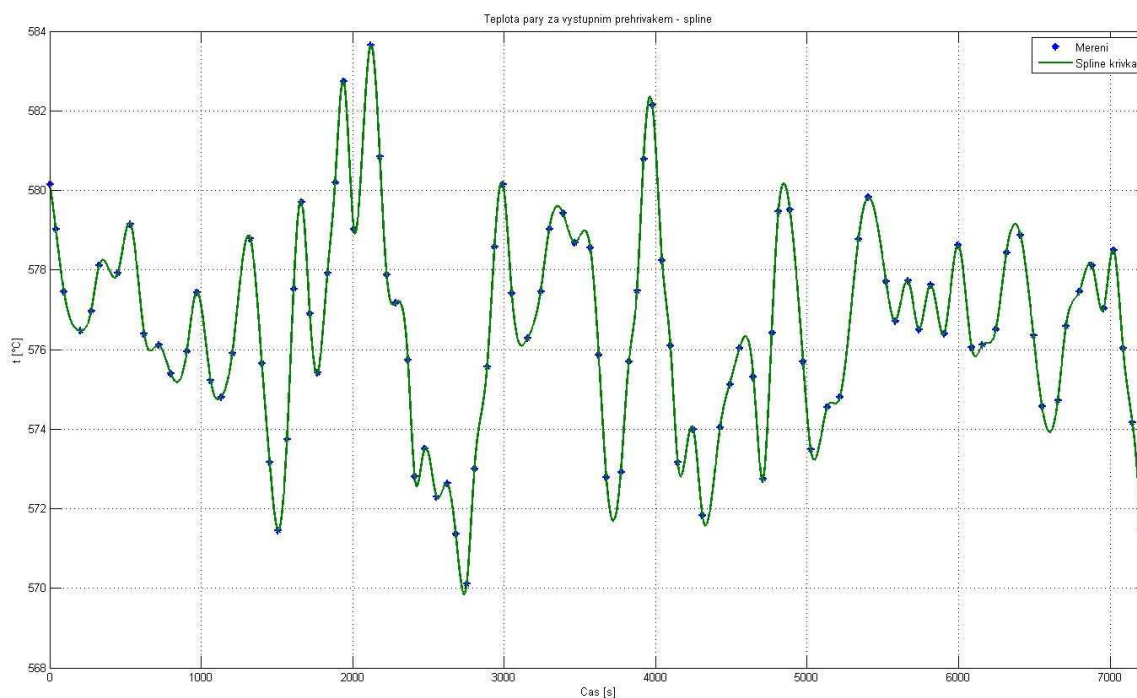


Obr. 4.3: Odezva výstupní veličiny y na poruchový signál pro různé hodnoty w



Obr. 4.4: Odezva akční veličiny u na poruchový signál pro různé hodnoty w

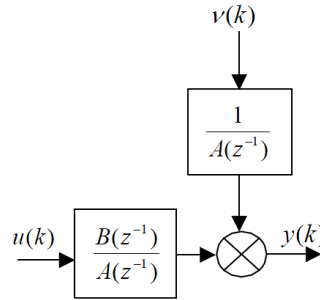
Z výše uvedených informací mohu postupovat při identifikaci výměníků vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny tak, že vyberu úseky s konstantní výkonovou hladinou. V tomto úseku nebudu pro potřeby identifikace uvažovat počáteční vhodně zvolený interval, kde by mělo v ideálním případě dojít k ustálení všech veličin. Ve zbylém úseku provedu identifikaci soustavy některými vybranými metodami, přičemž budu uvažovat, že jsou splněny podmínky kladené na regulátor. Při identifikaci soustavy se zaměřím na lineární stochastické modely typu ARX, ARMAX, BJ, OE, IV4, dále pak na nelineární stochastické modely NARX, Hammerstein a rekurzivní model ARX. Všechny tyto metody otestuji na identifikaci výstupního přehříváku. Při identifikaci nebudu uvažovat předřazené směšování výstupního přehříváku. Před samotným zahájením identifikace jsem musel upravit dostupné měření, které bylo vzorkováno s velkou periodou. Na krátkých úsecích s konstantní výkonovou hladinou by leželo jen malé množství vzorků potřebných pro estimaci jednotlivých modelů. Z tohoto důvodu jsem proložil naměřená data spline křivkou a nově jsem uvažoval vzorkovací periodu 1 s (obr. 4.5).



Obr. 4.5: Proložení naměřených dat spline křivkou (teplota páry za výstupním přehřívákem úsek měření H)

4.2 Model ARX a IV4

Model ARX je nejjednodušším lineárním stochastickým modelem [4], [9]. Skládá se z části deterministické a stochastické (obr. 4.6). Deterministická část představuje dynamiku systému vzhledem k užitečnému signálu $u(k)$ a stochastická část pak dynamiku šumového signálu $v(k)$. U modelu ARX se předpokládá, že šum přímo neovlivňuje výstup modelu $y(k)$, ale vstupuje do modelu přes filtr $1/A(z^{-1})$.



Obr. 4.6: Model ARX (shodný s IV4)

Přenos modelu ARX (IV4) lze vyjádřit rovnicí 27:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \frac{1}{A(z^{-1})}v(k) \quad (27)$$

Diferenční rovnici odpovídající ARX (IV4) modelu:

$$y(k) = -a_1y(k-1) - \dots - a_ny(k-n) + b_1u(k-1) + \dots + b_nu(k-m) + v(k) \quad (28)$$

Všechny identifikační metody se snaží minimalizovat stochastickou složku $v(k)$, která v regresní rovnici představuje chybu modelu. Mezi základní metody identifikace, minimalizující tuto chybu, patří metoda nejmenších čtverců. Pro identifikaci modelu ARX směšovače a výměníku jsem použil identifikační toolbox v Matlabu, který nabízí tyto algoritmy. Z měření reálného provozu jsou známy hodnoty $y(k)$, $u(k)$. Mým cílem je tedy najít parametry $a_1 \dots a_n$ a $b_1 \dots b_n$ modelu ARX minimalizující chybu $v(k)$. Model IV4 předpokládá stejnou strukturu jako ARX model, ale používá pro estimaci parametrů jiný algoritmus, tzv. Metodu instrumentálních proměnných (Instrumental Variable Method).

V Matlabu jsem experimentoval s různými druhy regresorů, tzn. vhodně jsem volil řád vstupního a výstupního polynomu diferenční rovnice (28). Identifikaci jsem provedl v okolí výkonové hladiny 200 MW na krátkém konstantním úseku měření L. Následně jsem testoval kvalitu modelu na zbývajících konstantních částech výkonové hladiny 200 MW v úseku měření L (obr. 4.7) a také na konstantní části výkonové hladiny 200 MW v úseku měření H (obr. 4.8).

V programu Matlab je pro účely verifikace modelu využíván tzv. Fit index (rovnice 29), který nám vyjadřuje míru shody modelu a měření. Nejlepší model je takový, u kterého se hodnota Fit indexu blíží hodnotě 100 %. Fit index ARX modelu pro výstupní přehřívák činil 46,44 % v úseku měření L a 37,12 % v úseku měření H. Fit index IV4 modelu pro výstupní přehřívák činil 35,31 % v úseku měření L a 31,05 % v úseku měření H.

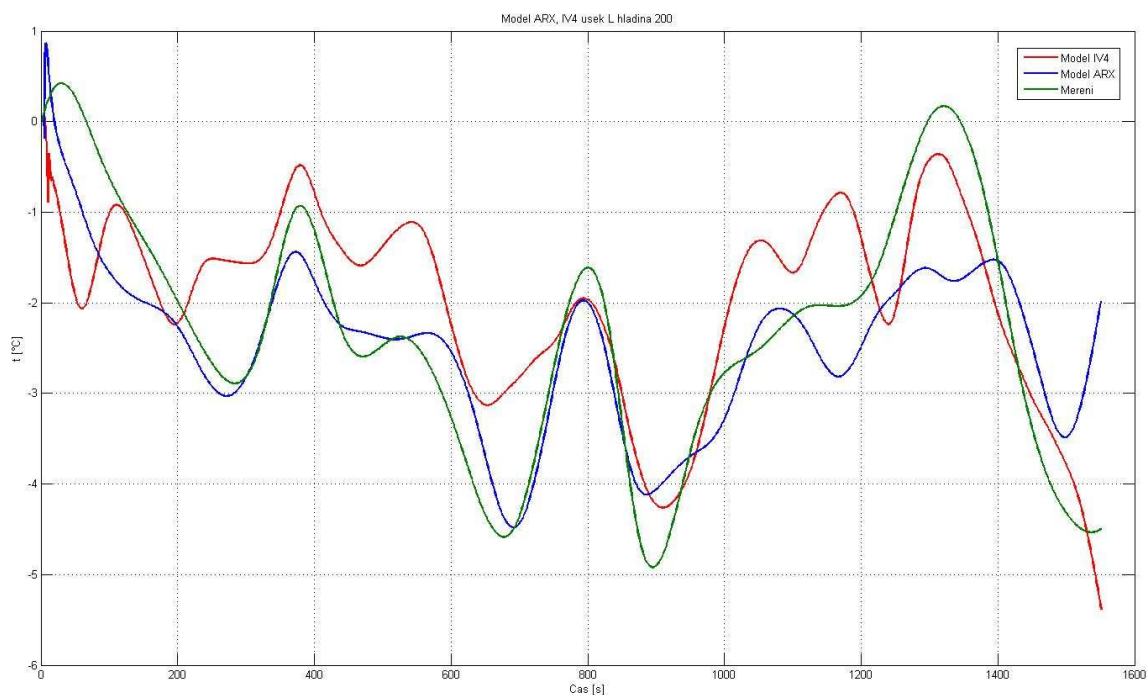
$$Fit\ index = \left(1 - \frac{|y - \hat{y}|}{|y - \bar{y}|}\right) \cdot 100 [\%] \quad (29)$$

y – změřený výstup

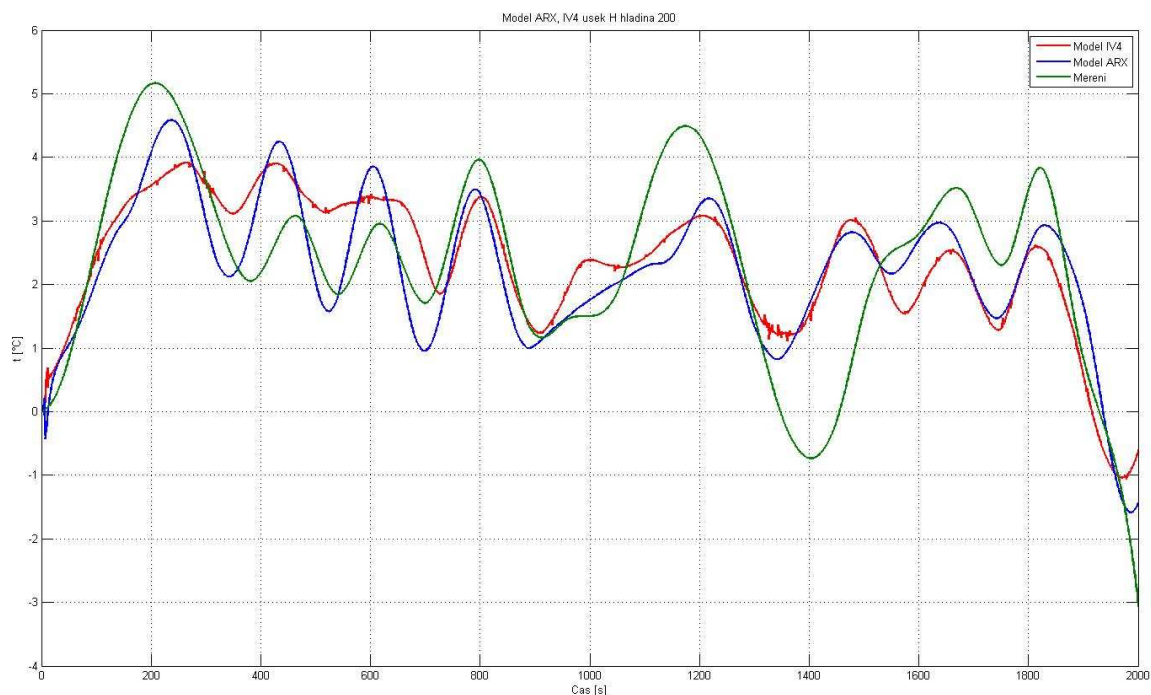
\hat{y} – simulovaný výstup

\bar{y} – střední hodnota změřeného výstupu

Znázorněné průběhy odpovídají modelu ARX s regresními polynomy pátého řádu a modelu IV4 s regresními polynomy sedmého řádu.



Obr. 4.7: Model ARX (Fit index 46,44 %) a model IV4 (Fit index 35,31 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření L



Obr. 4.8: Model ARX (Fit index 37,12 %) a model IV4 (Fit index 31,05 %) pro výstupní přehřívac, výkonová hladina 200 MW, úsek měření H

Estimované parametry ARX modelu ($A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$):

$$A(q) = 1 - 4.254q^{-1} + 7.067q^{-2} - 5.681q^{-3} + 2.173q^{-4} - 0.3065q^{-5}$$

$$B1(q) = -0.01402q^{-5} + 0.04944q^{-6} - 0.06436q^{-7} + 0.03647q^{-8} - 0.007529q^{-9}$$

$$B2(q) = 0.000126q^{-5} - 0.0003784q^{-6} + 0.0003701q^{-7} - 0.0001039q^{-8} - 1.418e-005q^{-9}$$

$$B3(q) = -2.059e-011q^{-5} + 9.807e-011q^{-6} - 1.152e-010q^{-7} + 4.566e-011q^{-8} - 8.137e-012q^{-9}$$

Estimované parametry IV4 model ($A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$):

$$A(q) = 1 - 0.08976q^{-1} - 0.1043q^{-2} - 0.2219q^{-3} - 0.2549q^{-4} - 0.2504q^{-5} - 0.05718q^{-6} - 0.06234q^{-7}$$

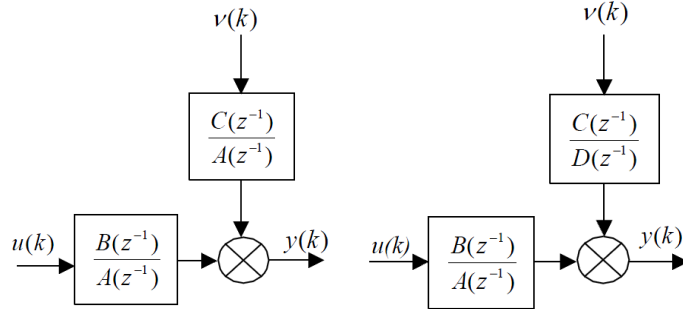
$$B1(q) = -0.2851q^{-5} - 0.04829q^{-6} - 0.0151q^{-7} + 0.02042q^{-8} + 0.1383q^{-9} + 0.1543q^{-10} + 0.05362q^{-11}$$

$$B2(q) = -0.07559q^{-5} + 0.05521q^{-6} + 0.01659q^{-7} - 0.01473q^{-8} + 0.02798q^{-9} + 0.01744q^{-10} - 0.04318q^{-11}$$

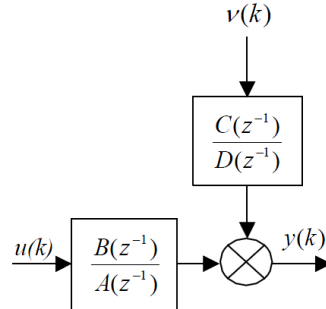
$$B3(q) = 1.588e-007q^{-5} - 3.626e-007q^{-6} + 2.946e-007q^{-7} - 2.198e-007q^{-8} + 3.97e-007q^{-9} - 3.959e-007q^{-10} + 1.392e-007q^{-11}$$

4.3 Model ARMAX, BJ a OE

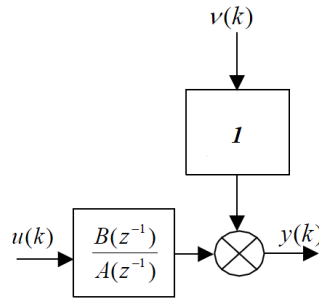
Po ověření modelu ARX a IV4 jsem následně otestoval složitější struktury stochastických modelů typu ARMAX, BJ a OE (obr. 4.9, 4.10, 4.11). Slovem složitější myslím zvýšení nároků na výpočetní algoritmus estimující parametry modelu. Vezmu-li v úvahu např. model ARMAX, který se liší oproti modelu ARX pouze v čitateli přenosu stochastické části, nelze již estimovat parametry jednoduchou metodou nejmenších čtverců.



Obr. 4.9: Model ARMAX



Obr. 4.10: Model BJ



Obr. 4.11: Model OE

Přenos modelu ARMAX lze vyjádřit rovnicí 30:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}v(k) \quad (30)$$

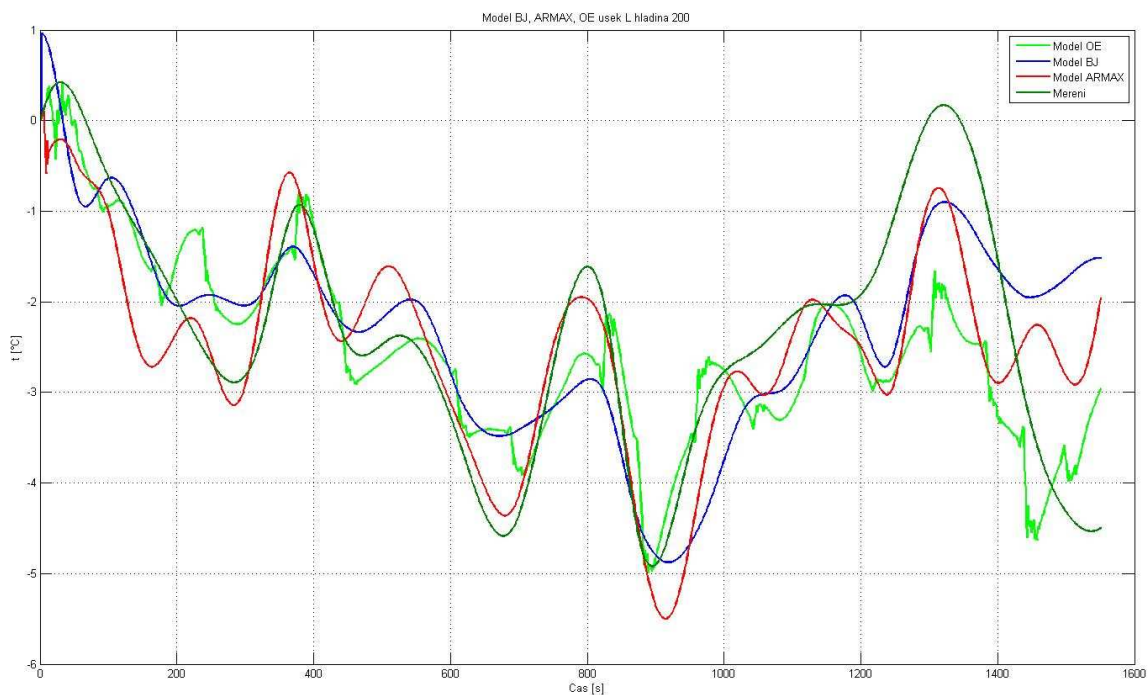
Přenos modelu BJ lze vyjádřit rovnicí 31:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}v(k) \quad (31)$$

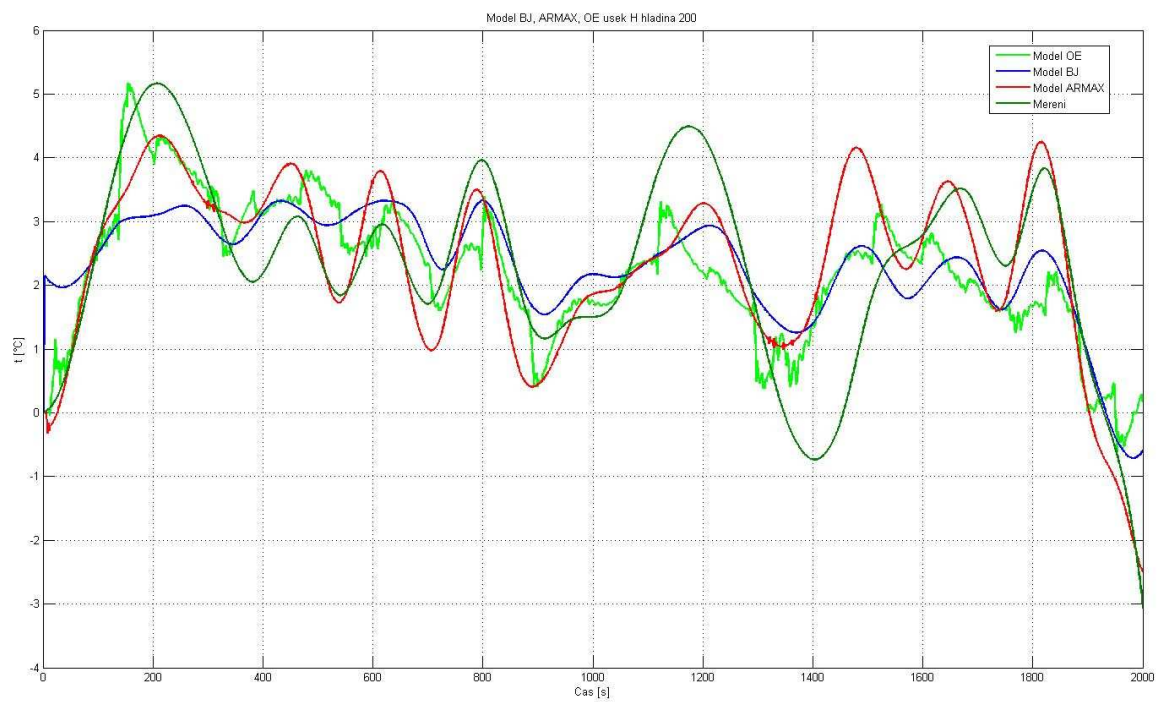
Přenos modelu OE lze vyjádřit rovnicí 32:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + v(k) \quad (32)$$

Stejně jako v případě modelů ARX a IV4 jsem i u modelů ARMAX, BJ a OE experimentoval s různými druhy regresorů, tzn. vhodně jsem volil řád vstupního a výstupního polynomu. Identifikaci jsem provedl v okolí výkonové hladiny 200 MW na krátkém konstantním úseku měření L. Následně jsem testoval kvalitu modelu na zbývajících konstantních částech výkonové hladiny 200 MW v úseku měření L (obr. 4.12) a také na konstantní části výkonové hladiny 200 MW v úseku měření H (obr. 4.13). Fit index ARMAX modelu pro výstupní přehřívák činil 40,46 % v úseku měření L a 31,69 % v úseku měření H. Fit index BJ modelu pro výstupní přehřívák činil 30,89 % v úseku měření L a 30,37 % v úseku měření H. Fit index OE modelu pro výstupní přehřívák činil 34,83 % v úseku měření L a 31,71 % v úseku měření H. U modelu ARMAX jsem zvolil regresní polynomy sedmého řádu. U modelu BJ jsem zvolil regresní polynomy druhého řádu. U modelu OE jsem zvolil regresní polynomy desátého řádu. Všechny estimované parametry jsou uvedeny v příloze H.



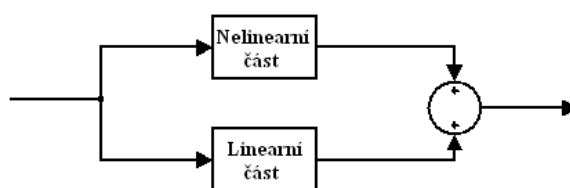
Obr. 4.12: Model ARMAX (Fit index 40,46 %), model BJ (Fit index 30,89 %), model OE (Fit index 34,83 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření L



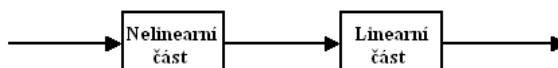
Obr. 4.13: Model ARMAX (Fit index 31,69 %), model BJ (Fit index 30,37 %), model OE (Fit index 31,71 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření H

4.4 Model NARX a Hammerstein

Další skupinu modelů, které jsem vyzkoušel, tvoří nelineární stochastické modely typu NARX a Hammerstein. Model NARX, neboli nelineární ARX, se skládá z paralelní kombinace nelineární a lineární části (obr. 4.14). Model Hammerstein se skládá ze sériové kombinace nelineární a lineární části (obr. 4.15). Výhodou těchto modelů je, že jsou schopny pokrýt i případnou nelinearitu systému. V identifikačním toolboxu v Matlabu si můžeme zvolit vhodně typ nelinearity a k tomu experimentovat s regresory lineární části.

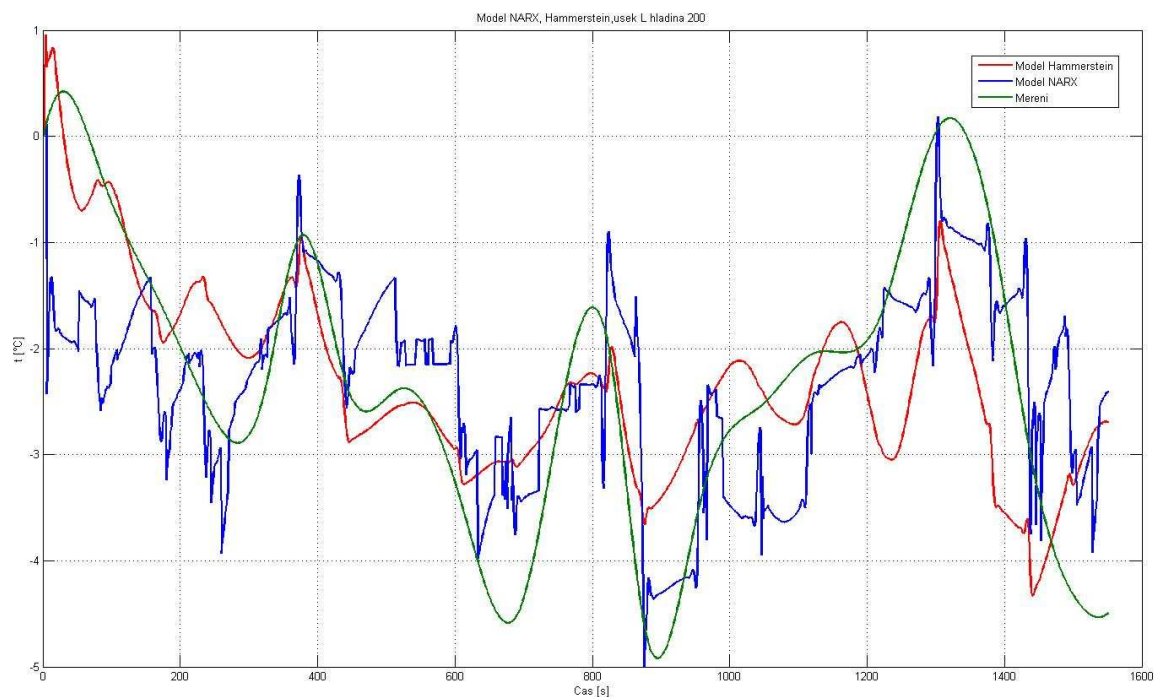


Obr. 4.14: Struktura modelu NARX

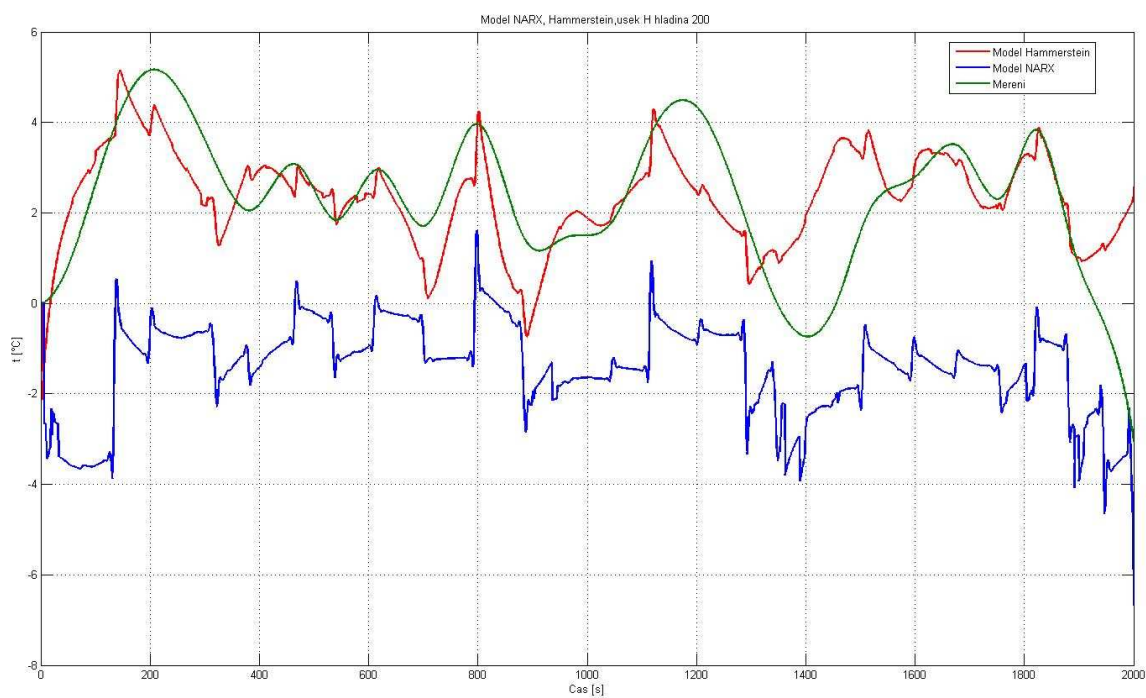


Obr. 4.15: Struktura modelu Hammerstein

Identifikaci pomocí modelu NARX a Hammerstein jsem provedl stejně jako u ostatních stochastických modelů v okolí výkonové hladiny 200 MW na krátkém konstantním úseku měření L. Následně jsem testoval kvalitu modelu na zbývajících konstantních částech výkonové hladiny 200 MW v úseku měření L (obr. 4.16) a také na konstantní části výkonové hladiny 200 MW v úseku měření H (obr. 4.17). Fit index NARX modelu pro výstupní přehřívač činil 27,81 % v úseku měření L a -160,8 % v úseku měření H. Fit index Hammerstein modelu pro výstupní přehřívač činil 31,04 % v úseku měření L a 17,22 % v úseku měření H. U obou modelů jsem zvolil regresní polynomy druhého řádu.



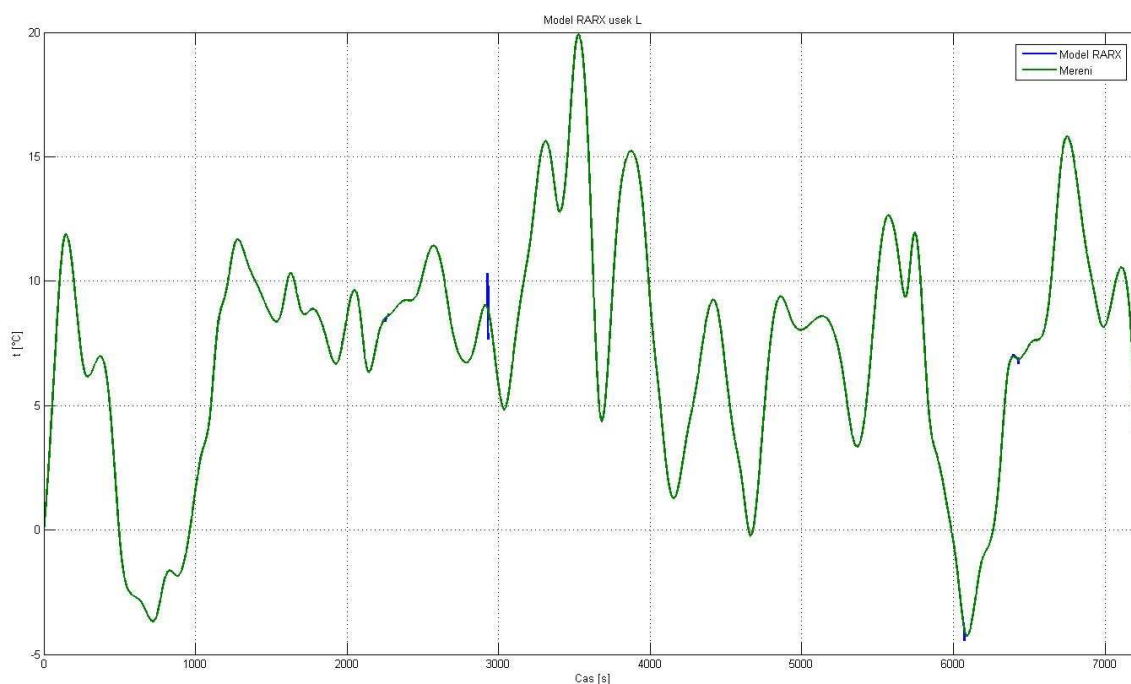
Obr. 4.16: Model NARX (Fit index 27,81 %), model Hammerstein (Fit index 31,04 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření L



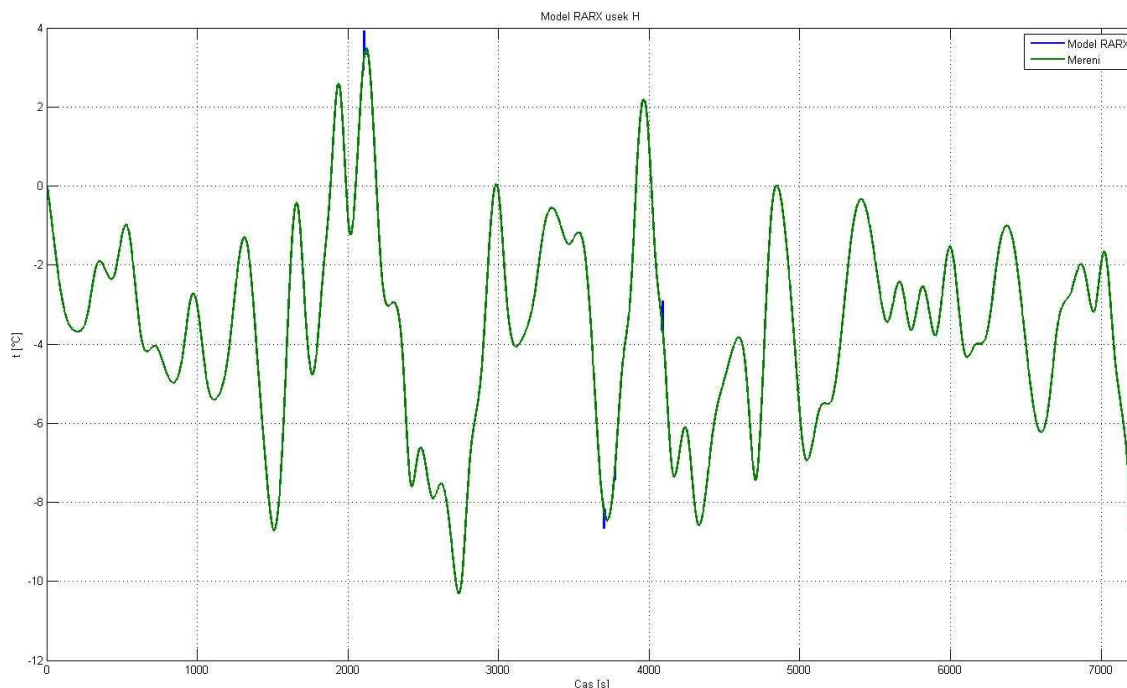
Obr. 4.17: Model NARX (Fit index -160,8 %), model Hammerstein (Fit index 17,22 %) pro výstupní přehřívák, výkonová hladina 200 MW, úsek měření H

4.5 Rekurzivní model ARX

Rekurzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním je zajímavou alternativou oproti statickým algoritmům estimujícím parametry ARX modelu dynamické soustavy. O této soustavě se předpokládá, že její parametry se mohou pomalu měnit. Rekurzivní přístup k identifikaci je schopen pokrýt případnou nelinearitu a stochastický charakter soustavy (obr. 4.18, 4.19). Adaptivní chování modelu je zajištěno přidáním koeficientu exponenciálního zapomínání φ do regresních rovnic. S rostoucím časem procesu identifikace jsou tímto koeficientem potlačeny starší regresní rovnice a k získání parametrů ARX modelu se uvažují jen ty aktuální. Míra zapomínání je dána vhodnou volbou koeficientu φ v intervalu od 0 do 1. Nejčastěji se však volí koeficient φ z intervalu od 0,95 do 1. Jestliže volíme $\varphi = 1$ nebudou zapomínány starší hodnoty měření. V mém případě jsem použil při identifikaci hodnotu koeficientu $\varphi = 0,98$ a diskretní přenos druhého řádu deterministické a stochastické části ARX modelu výstupního přehříváku. Fit index rekurzivního ARX modelu pro výstupní přehřívák činil 99,82 % v celém úseku měření L a 99,93 % v celém úseku H.



Obr. 4.18: Rekurzivní ARX (Fit index 99,82 %) pro výstupní přehřívák, úsek měření L



Obr. 4.19: Rekurzivní ARX (Fit index 99,93 %) pro výstupní přehřívák, úsek měření H

4.6 Vyhodnocení identifikace

Po odzkoušení různých identifikačních přístupů na modelu výstupního přehříváku jsem mohl porovnat dosažené výsledky a navrhnout optimální strategii identifikace vysokotlakové části průtočného kotle (tab. 4.1). Velikou nevýhodou je, že identifikovaná soustava je značně nelineární a stochastická. Lineární stochastické modely vykazovaly průměrné výsledky s Fit indexem okolo 40 %, přičemž trend změny teploty byl přibližně zachován. Jako nejlepší z lineárních stochastických modelů pracoval model ARX s Fit indexem 46,44 % v úseku měření L a 37,12 % v úseku měření H. Dále pak model ARMAX s Fit indexem 35,31 % v úseku měření L a 31,05 % v úseku měření H. Modely IV4, BJ a OE dosáhly horších výsledků, než modely ARX a ARMAX. Všechny modely vykazovaly, jak v úseku měření L, tak v úseku měření H na výkonové hladině 200 MW, přibližně stejné výsledky. Z tohoto důvodu lze tyto lineární stochastické modely použít na pokrytí jedné výkonové hladiny. Model ARX pokrývá výkonovou hladinu 200 MW s přesností okolo 40 %. Obecně jsou dosažené výsledky u lineárních stochastických modelů slabé. Je to dáno špatnou kvalitou měřeného signálu, nepřesností při stanovení potřebných neměřených veličin a v neposlední řadě možnou chybou při interpolaci dat.

Nelineární stochastické modely NARX a Hammerstein nevykazovaly dobré identifikační výsledky v okolí výkonové hladiny 200 MW. Ačkoliv první předpoklad byl, že mohou pokrýt případnou nelinearitu soustavy, ve srovnání s lineárními stochastickými modely ARX a ARMAX dopadly hůře (tab. 4.1). Nejlépe ze všech použitých metod identifikace dopadl rekurzivní model ARX (tab. 4.1). Rekurzivní přístup k identifikaci je schopen pokrýt případnou nelinearitu a stochastický charakter soustavy. Takový model by mohl v případě potřeby posloužit k návrhu adaptivního prediktivního řízení. Článek [10] zkoumá takové možnosti použití prediktivního řízení MPC pro řízení nelineárních systémů. V tomto článku je popsán samočinně se nastavující prediktivní regulátor, který vznikl spojením průběžné identifikace lineárního modelu regulované soustavy a prediktivního řízení na základě tohoto modelu.

Tab. 4.1: Přehled výsledků jednotlivých metod identifikace

Best fit [%]		
Lineární stochastické modely	úsek měření L	úsek měření H
ARX	46,44	37,12
ARMAX	40,46	31,69
BJ	30,89	30,37
OE	34,83	31,71
IV4	35,31	31,05
Nelineární stochastické modely	úsek měření L	úsek měření H
NARX	27,81	-160,8
Hammerstein	31,04	17,32
Rekurzivní stochastické modely	úsek měření L	úsek měření H
Rekurzivní ARX	99,82	99,93

Přijatelný model regulované vysokotlaké části průtočného kotle by měl vystihovat soustavu pro celé pásmo výkonových hladin. Za tímto účelem by bylo zapotřebí sestavit pásový model soustavy, jelikož statické metody nepokryjí všechny výkonové hladiny najednou. Nejlepší výsledky ze všech statických metod vykazoval lineární stochastický model ARX, který je schopen pokrýt jednu výkonovou hladinu s přesností okolo 40 %. Nevýhodou je, že je k dispozici pouze záznam provozního měření soustavy, který není vhodný pro identifikační účely. Je to dáno tím, že v měření jsou převážně obsaženy dlouhé trendové změny přes všechny výkonové hladiny. Pro sestavení takového pásového modelu by bylo zapotřebí provést speciální identifikační měření pro všechny výkonové hladiny. Výsledný model by popisoval soustavu pro jednotlivé konstantní výkonové hladiny, přičemž trendové změny by přístupem založeným na přímé identifikaci bez přídavného signálu popsat nešlo. Výsledky identifikace by zlepšil kvalitnější naměřený signál a měření dodaného tepelného příkonu do všech výměníků, které nebylo v mém případě k dispozici. Rekurzivní model ARX dává prostor pro nasazení některých adaptivních regulačních algoritmů, jako např. adaptivní MPC. Při hledání závislosti mezi žádaným výkonem z terminálu a generovaným tepelným příkonem zpětnovazební strukturou pomocí identifikace, jsem nenalezl žádné vazby.

5 Závěr

Cílem této práce bylo verifikovat nelineární model vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny. Pro potřeby verifikace byly k dispozici apriorní informace v podobě provozního měření reálné soustavy průtočného kotle tepelné elektrárny. Aby bylo možné verifikovat nelineární model vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny pomocí dostupného měření a provést potřebné simulace, bylo nejprve nutné stanovit některé neměřené veličiny. Mezi tyto veličiny patřil dodaný tepelný příkon do jednotlivých výměníků, s jehož znalostí model přímo počítá, a také průtok, který je měřen pouze v některých částech průtočného kotle. Neměřený průtok před jednotlivými výměníky byl zpětně dopočítán ze znalosti průtoku za výstupním přehřívákem a ze stanoveného průtoku přes jednotlivé směšovací ventily.

Pro získání neznámého dodaného tepelného příkonu do jednotlivých výměníků byl použit samotný nelineární model vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny na základě myšlenky, že je platný v celém rozsahu a věrně reprezentuje chování regulované soustavy. V takovém případě, je při znalosti ostatních veličin, jedinou neznámou právě dodaný tepelný příkon. Pro jeho stanovení bylo použito klasické zpětnovazební zapojení PID regulátoru a nelineárního modelu regulované soustavy, které generovalo potřebný akční zásah, resp. neznámý dodaný tepelný příkon.

Po stanovení všech potřebných veličin byl nelineární model vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny verifikován. Tato práce se věnovala pouze verifikaci vysokotlaké části průtočného kotle umístěné za bifluxem pro výměníky šoty I, šoty II a výstupní přehřívák. Generovaný tepelný příkon musel být zahrnut do verifikace, jelikož byl zpětně generován právě pomocí našeho modelu. Při samotné verifikaci byla kvantifikována chyba modelu a dodaného tepelného příkonu pomocí kvadratického kritéria, vizuálního porovnání a vybranými statistickými metodami. Z výsledků verifikace vyplývá, že model vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny s tepelným příkonem generovaným zpětnovazební strukturou, se shoduje s chováním reálné soustavy v řádu jednotek procent. Chování modelu je tedy totožné s chováním reálné soustavy a model může být použit pro návrh pokročilých regulačních algoritmů.

V závěru této práce byly diskutovány možnosti identifikace nelineární soustavy vysokotlaké části průtočného kotle tepelné elektrárny na základě provozního měření. Jelikož se v tomto případě jednalo o problém identifikace v uzavřené smyčce, byl zvolen přístup založený na metodě přímé identifikace bez přídavného signálu. Z tohoto důvodu se identifikace věnovala pouze úsekům s konstantní výkonovou hladinou. Nejlépe z lineárních stochastických metod dopadl model ARX a model ARMAX. Z výsledků identifikačních experimentů bylo možné konstatovat, že lze pomocí těchto modelů pokrýt jednu výkonovou hladinu a použít přístup

založený na metodě přímé identifikaci bez přídavného signálu k tvorbě pásového modelu nelineární soustavy průtočného kotle. Tento pásový model by musel být omezen pouze na úseky s konstantní výkonovou hladinou, jelikož trendové změny nelze použitým přístupem identifikace zachytit. Nelineární stochastické modely NARX a Hammerstein nevykazovaly dobré identifikační výsledky i za předpokladu, že by mohly pokrýt případnou nelinearitu soustavy. Velmi dobře dopadl rekurzivní model ARX, který dává prostor pro nasazení některých adaptivních regulačních algoritmů, jako např. adaptivní MPC. Při hledání závislosti mezi žádaným výkonem z terminálu a generovaným tepelným příkonem použitou zpětnovazební strukturou pomocí identifikace, nebyla nalezena žádná vazba.

Výsledky identifikace by zlepšil kvalitnější naměřený signál. Pro další zlepšení kvality modelu, a pro dosažení lepších výsledků identifikace, by bylo zapotřebí přesně stanovit dodaný tepelný příkon do jednotlivých výměníků. Pro tvorbu pásového modelu nelineární soustavy průtočného kotle pomocí identifikace by bylo nutné provést speciální měření pro konstantní úseky výkonové hladiny bez velkých trendových změn.

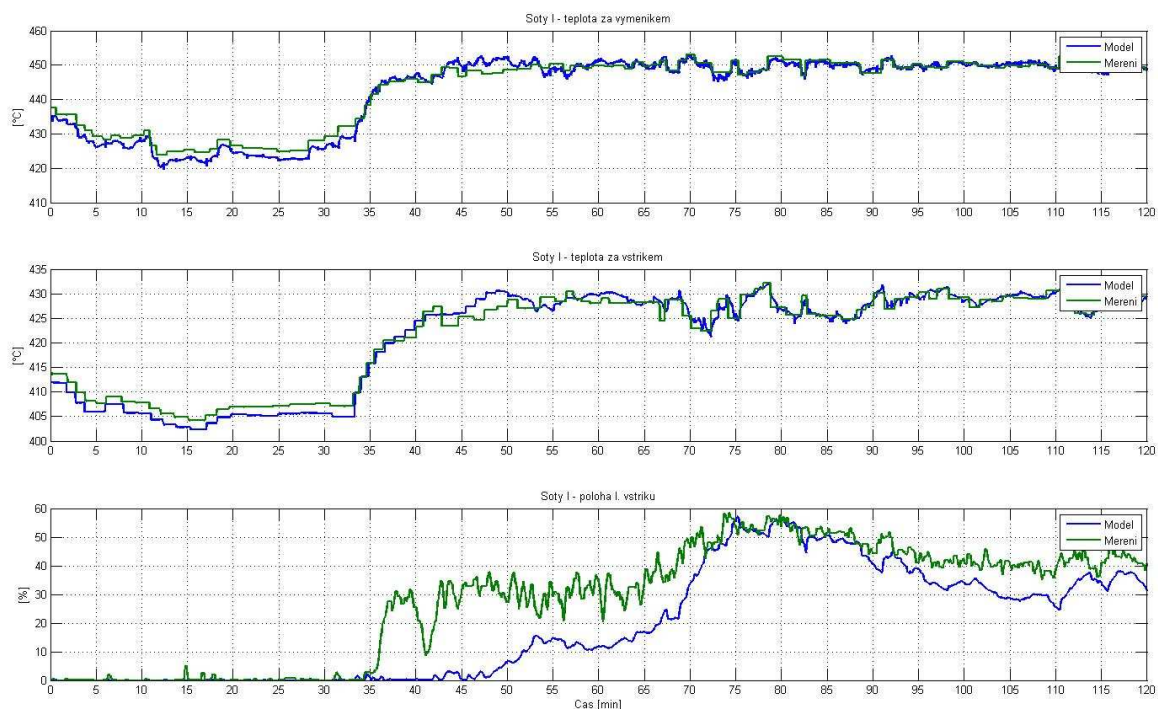
.

6 Použitá literatura

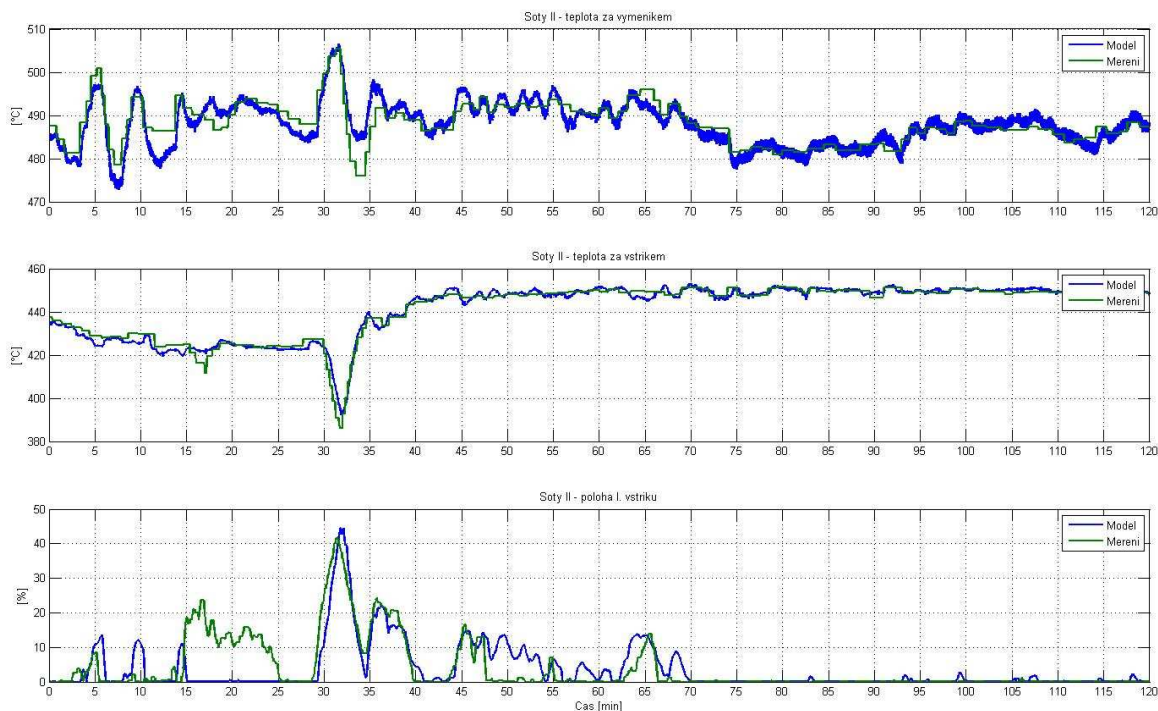
- [1] IBLER, Z. *Technický průvodce energetika: 1. díl*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 616 p. ISBN 8073000261.
- [2] HUBKA, L. *Vybrané modely funkčních podsystémů parního kotle*. Dizertační práce. Liberec: TUL, 2010. 153 p.
- [3] VILIMEC, L. *Provoz a regulace energetických zařízení*. Ostrava: VŠB, 2007. 263 p.
- [4] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: MONTANEX, 1999. 276 p. ISBN 80-7225-030-2.
- [5] LJUNG, L. *System Identification - Theory For the User*. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 672 p. ISBN 0136566952.
- [6] *Closed-loop subspace identification of Hammerstein-Wiener models: IEEE Conference on Decision and Control CDC held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference (2009)*. Edited by Wingerden, J. Ieee, 2009. ISBN 9781424438716.
- [7] FORSSELL, U. *Closed-loop Identification Methods, Theory, and Applications*. Sweden: Linus & Linnea AB, 1999. 263 p. ISBN 91-7219-432-4.
- [8] HOF, P. M. J. V. D. Identification and Control - Closed-loop Issues. *Automatica*, 1995, , no. 12, p. 1751–1770. DOI: 10.1016/0005-1098(95)00094-X.
- [9] MATĚJKA, J. *Metoda nejmenších čtverců v identifikaci dynamických systémů*. Brno: VUT, 2009. 32 p. Bakalářská práce.
- [10] CHALUPA, P. *Prediktivní řízení nelineárních systémů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 9 p.

7 Příloha

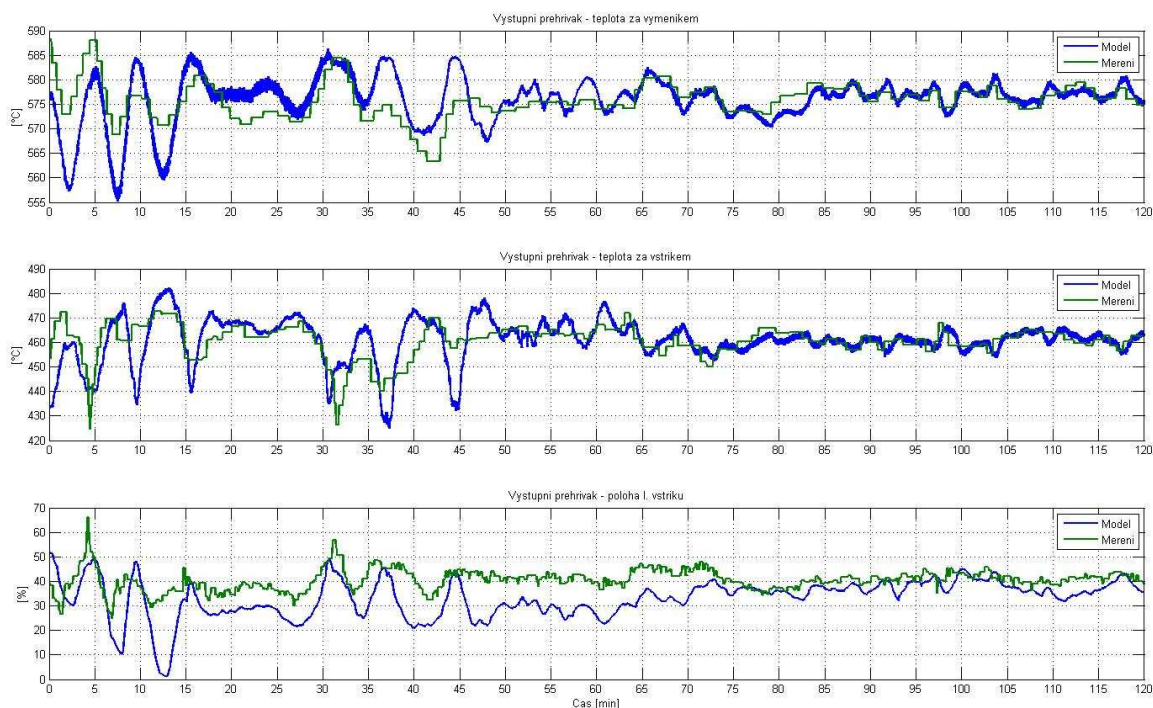
Příloha A - verifikace v úseku F



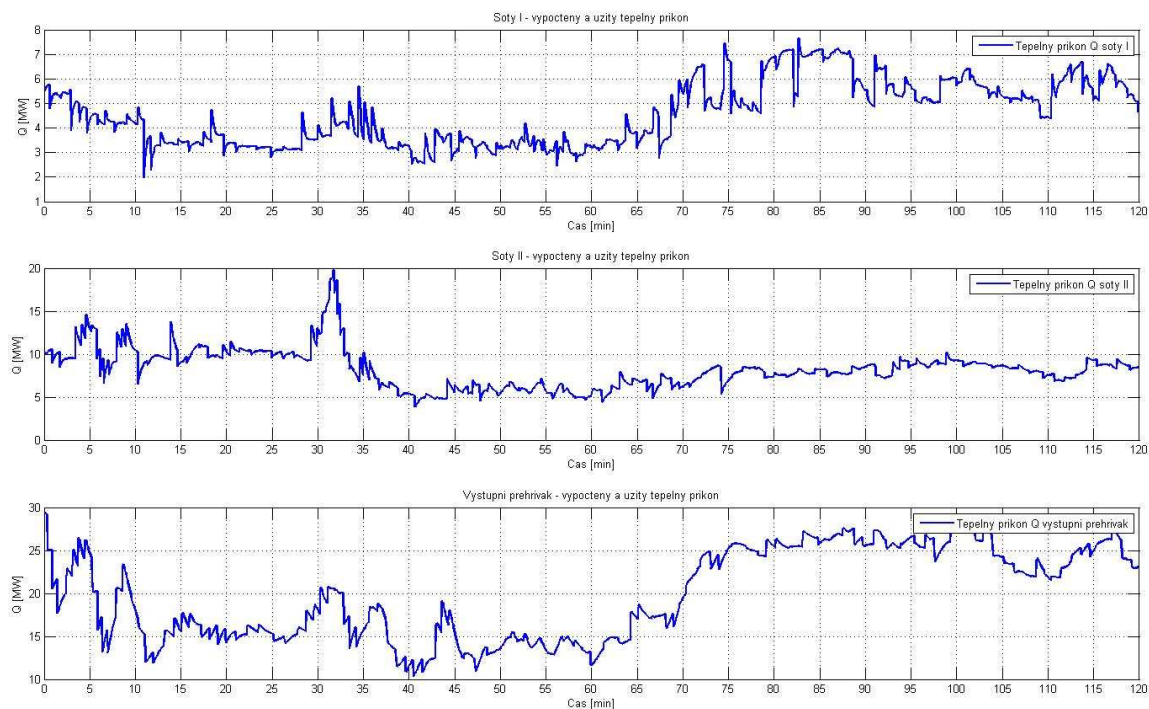
Obr. 7.1: Porovnání modelu a měření v úseku F (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



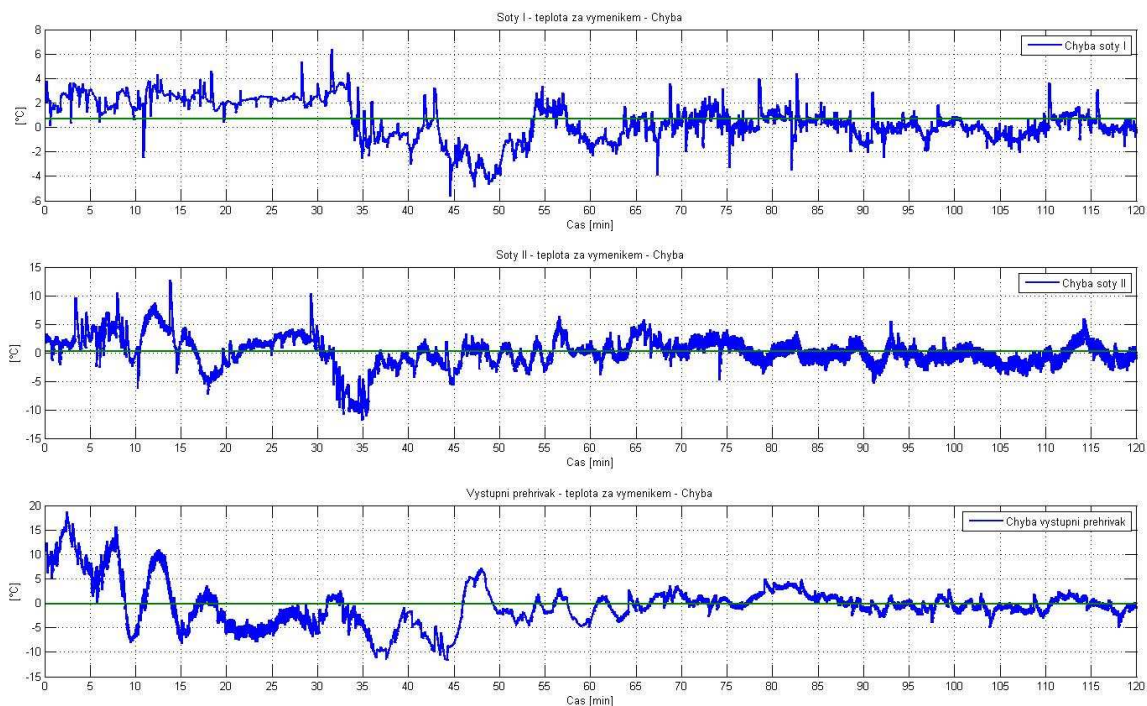
Obr. 7.2: Porovnání modelu a měření v úseku F (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstříkem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.3: Porovnání modelu a měření v úseku F (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstříkem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 7.4: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku F s odhadem střední hodnoty

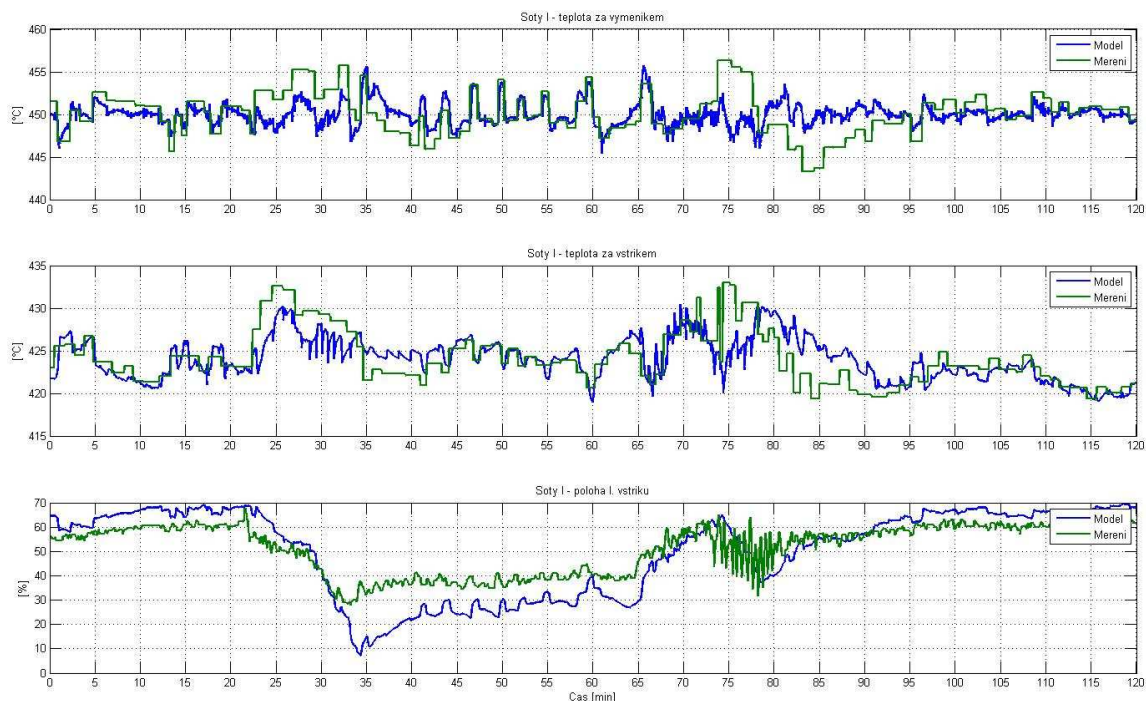


Obr. 7.5: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku F s odhadem střední hodnoty

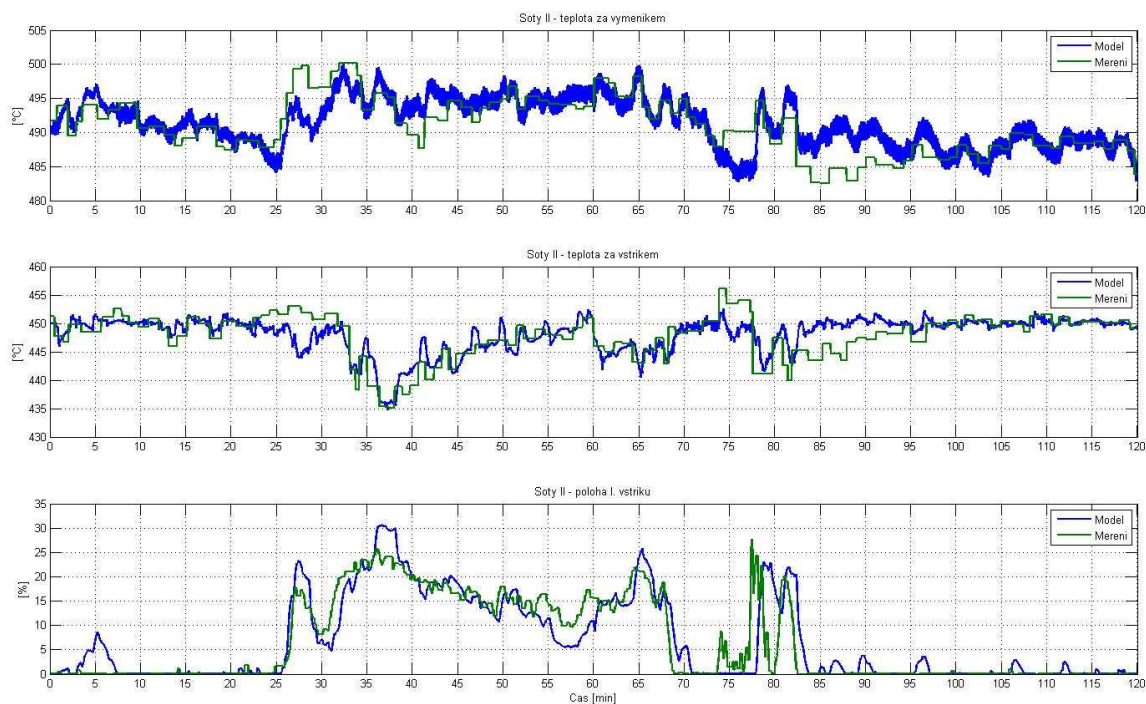
Tab. 7.1: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku F

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	5,97E+04	4,706	442,007	0,670	6,379	5,96E-06	2,370	1,540
Šoty II	1,54E+05	8,477	487,389	0,215	12,787	6,02E-06	7,217	2,687
Výstupní přehřívák	4,00E+05	20,491	575,942	-0,107	18,702	5,58E-06	18,905	4,348

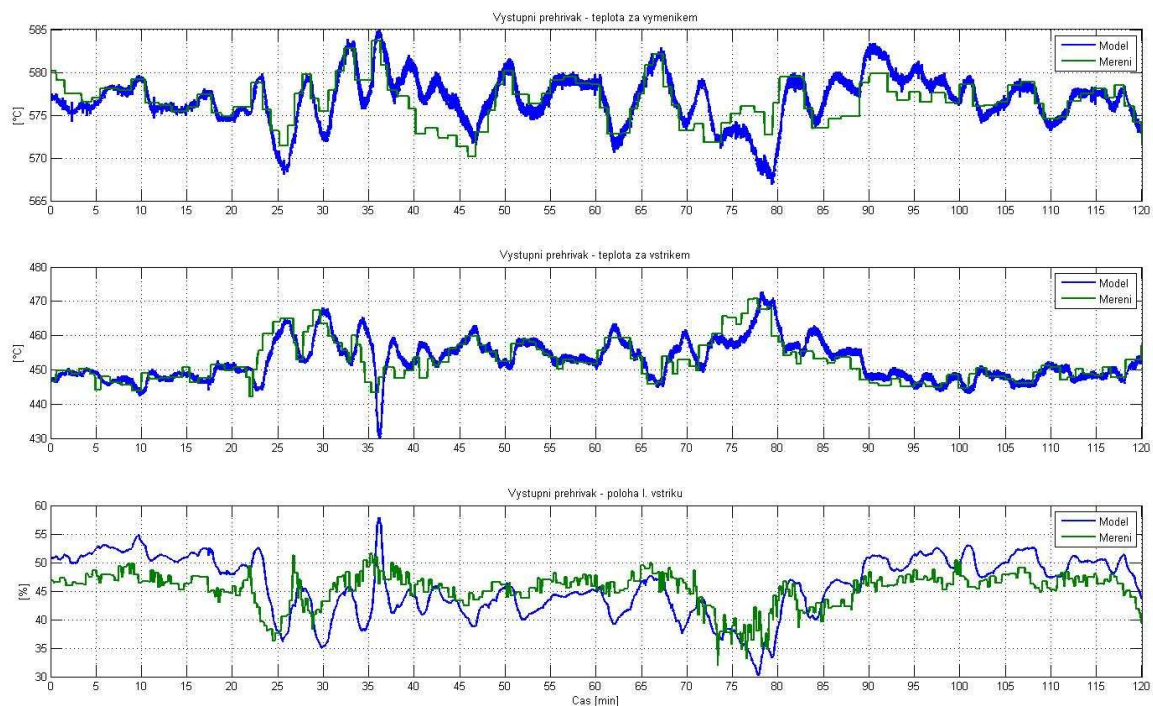
Příloha B – verifikace v úseku H



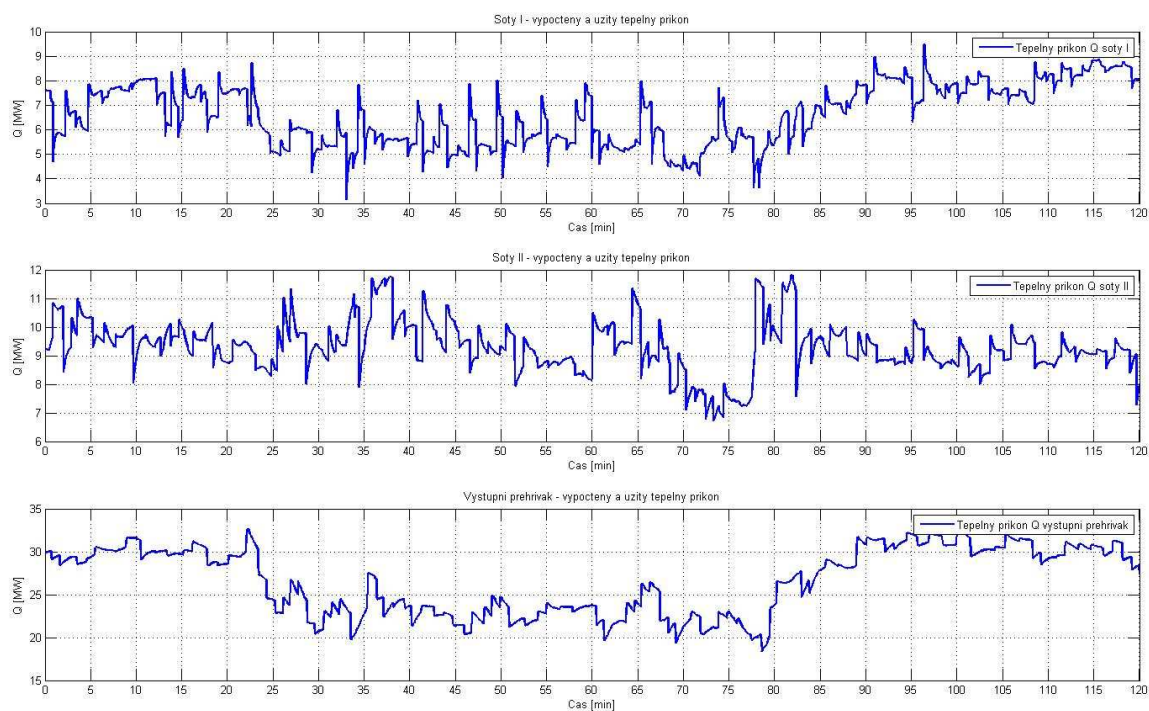
Obr. 7.6: Porovnání modelu a měření v úseku H (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



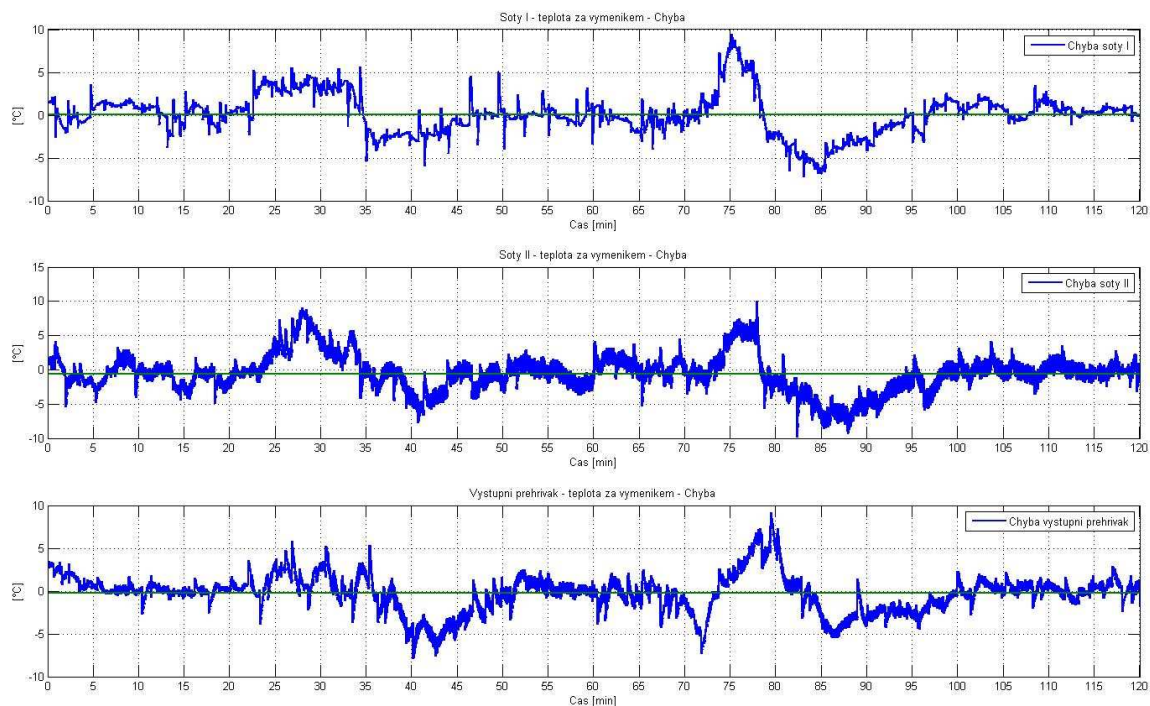
Obr. 7.7: Porovnání modelu a měření v úseku H (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.8: Porovnání modelu a měření v úseku H (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstříkem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstříkování výstupního přehříváku)



Obr. 7.9: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku H s odhadem střední hodnoty

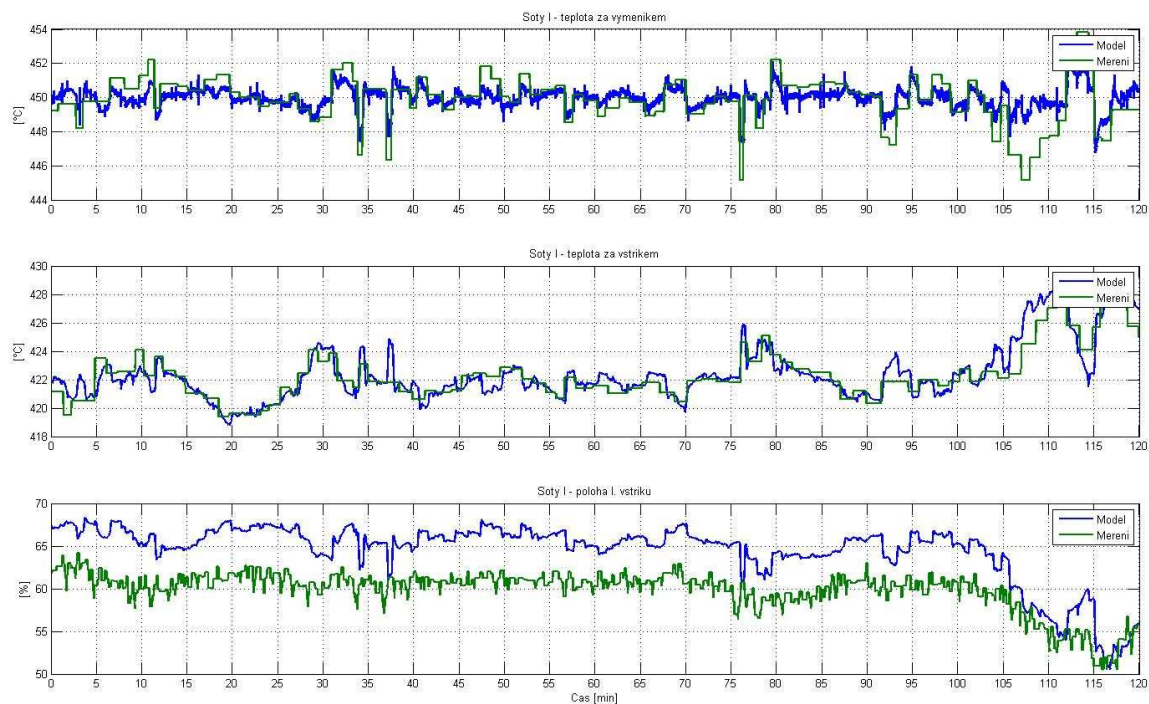


Obr. 7.10: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku H s odhadem střední hodnoty

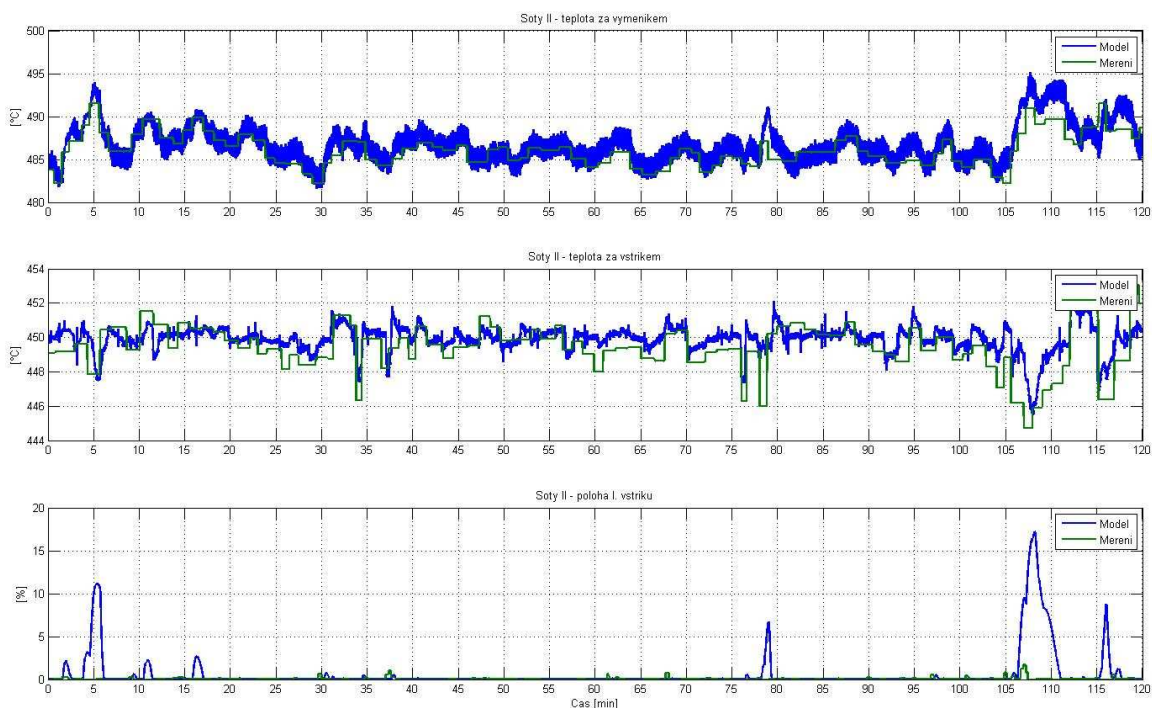
Tab. 7.2: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku H

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	1,23E+05	6,673	449,998	0,042	9,449	1,53E-04	5,452	2,335
Šoty II	1,74E+05	9,279	491,196	-0,571	10,075	1,41E-04	7,368	2,714
Výstupní přehřívák	1,09E+05	26,853	576,876	-0,285	9,148	8,74E-05	4,738	2,177

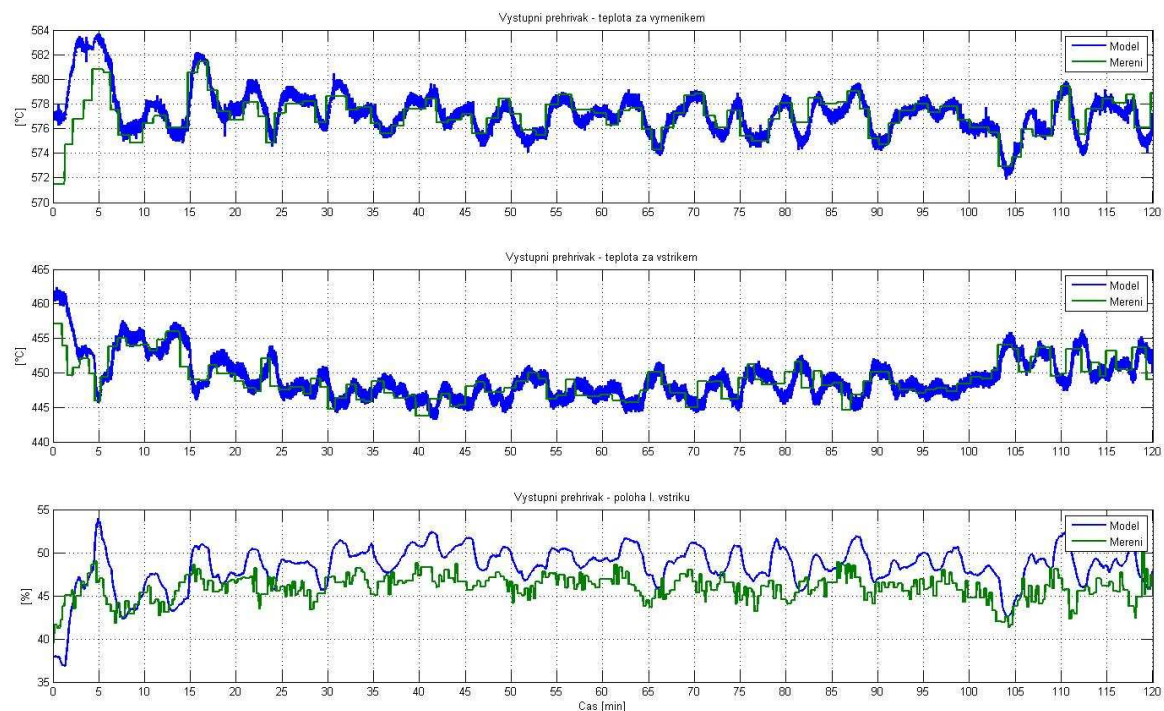
Příloha C – verifikace v úseku I



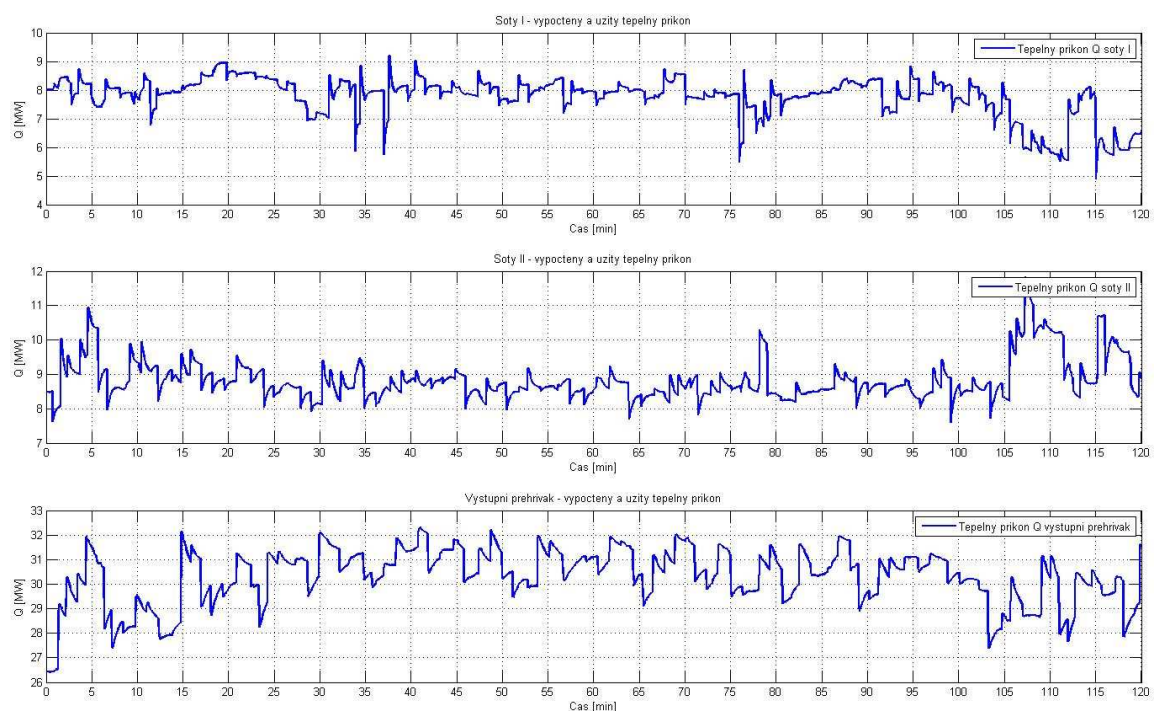
Obr. 7.11: Porovnání modelu a měření v úseku I (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



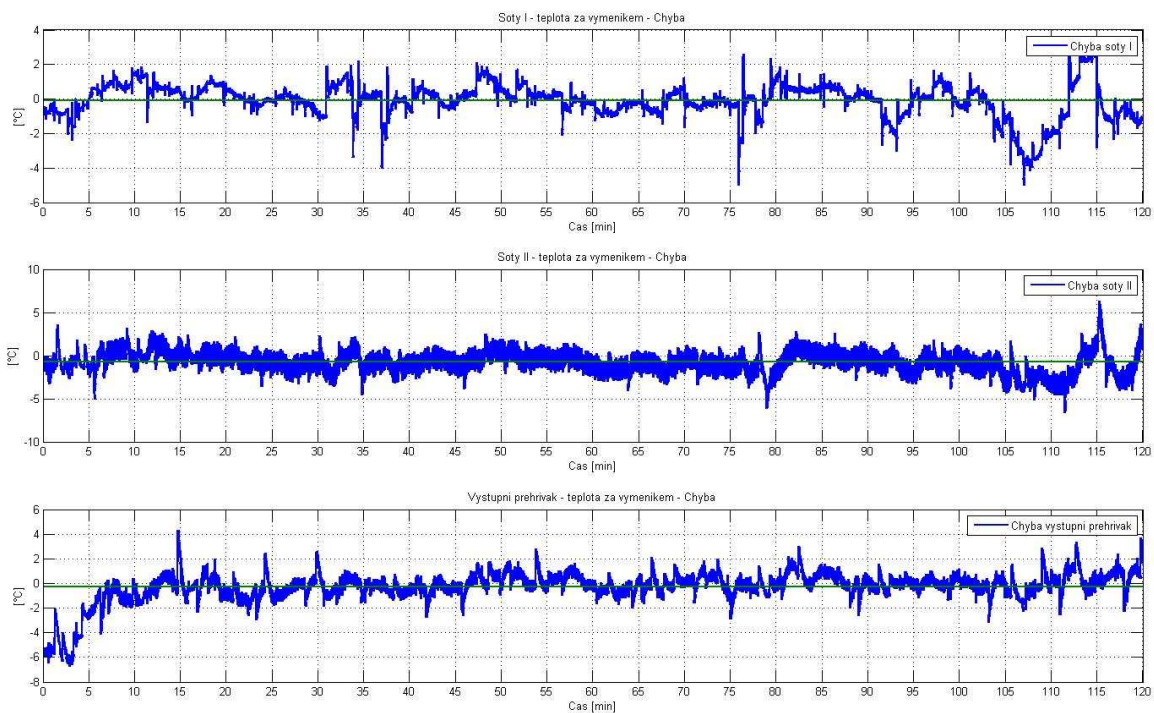
Obr. 7.12: Porovnání modelu a měření v úseku I (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.13: Porovnání modelu a měření v úseku I (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstříkem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstříkávání výstupního přehříváku)



Obr. 7.14: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku I s odhadem střední hodnoty

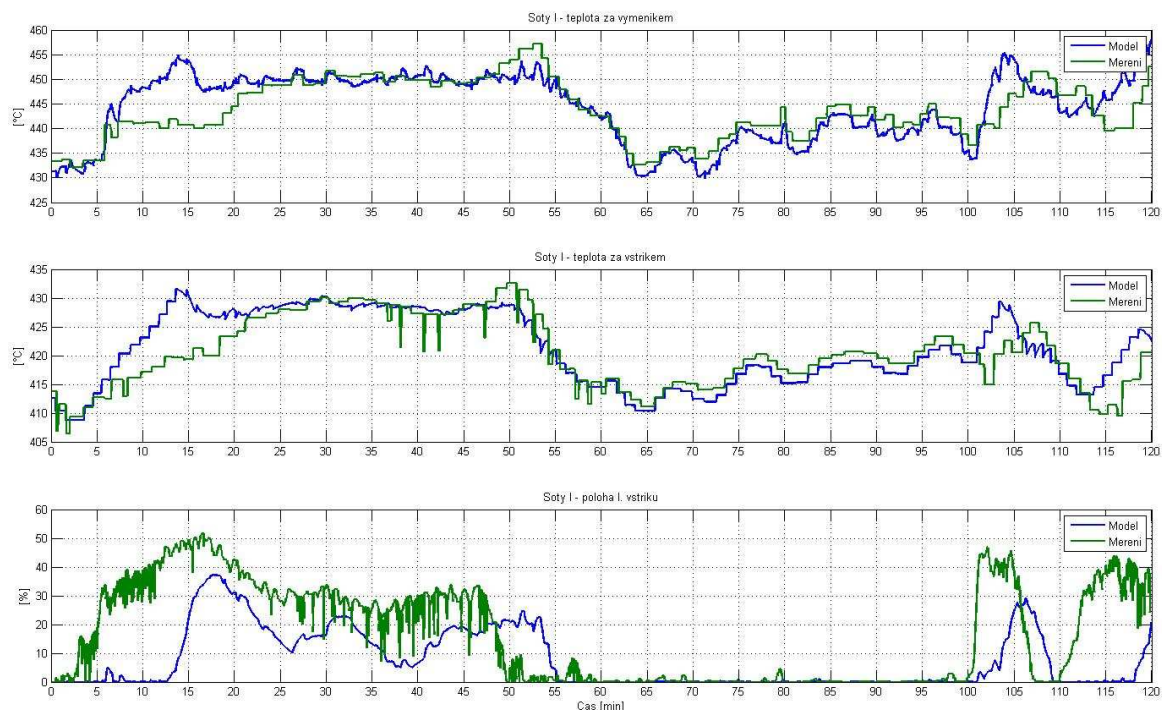


Obr. 7.15: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku I s odhadem střední hodnoty

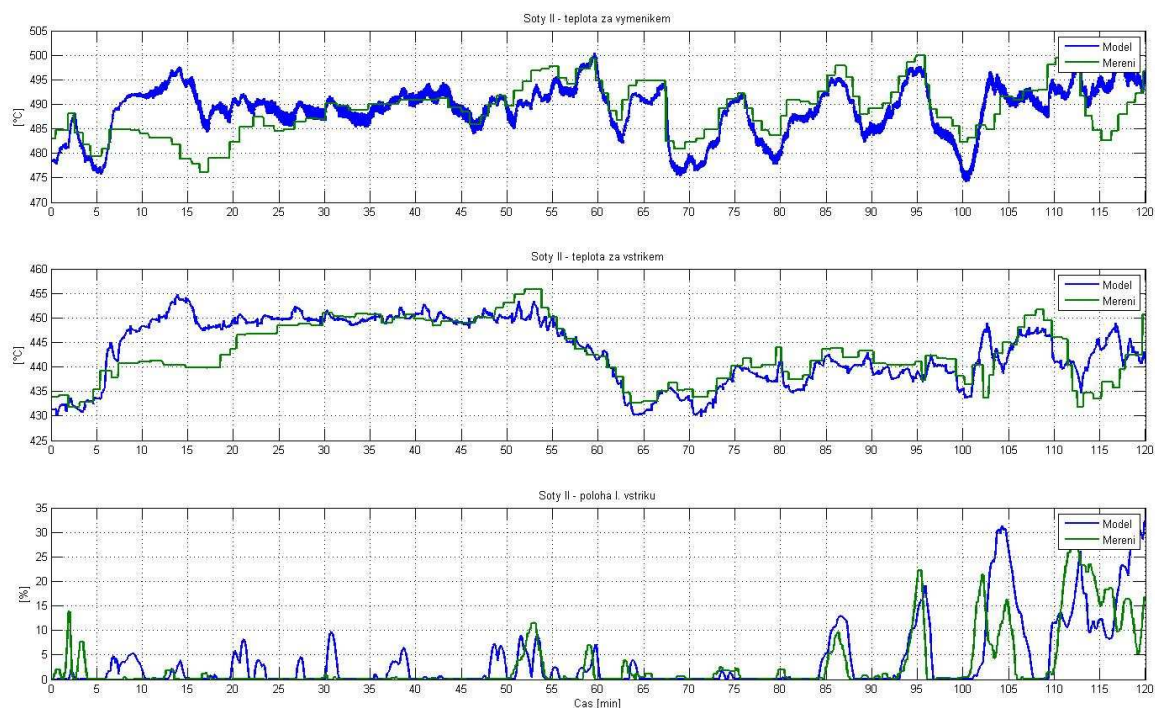
Tab. 7.3: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku I

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	2,54E+04	7,751	449,975	-0,097	4,988	2,08E-06	1,007	1,004
Šoty II	5,29E+04	8,818	486,808	-0,776	6,593	2,27E-05	1,511	1,229
Výstupní přehřívák	4,23E+04	30,271	577,262	-0,287	6,714	6,79E-05	1,608	1,268

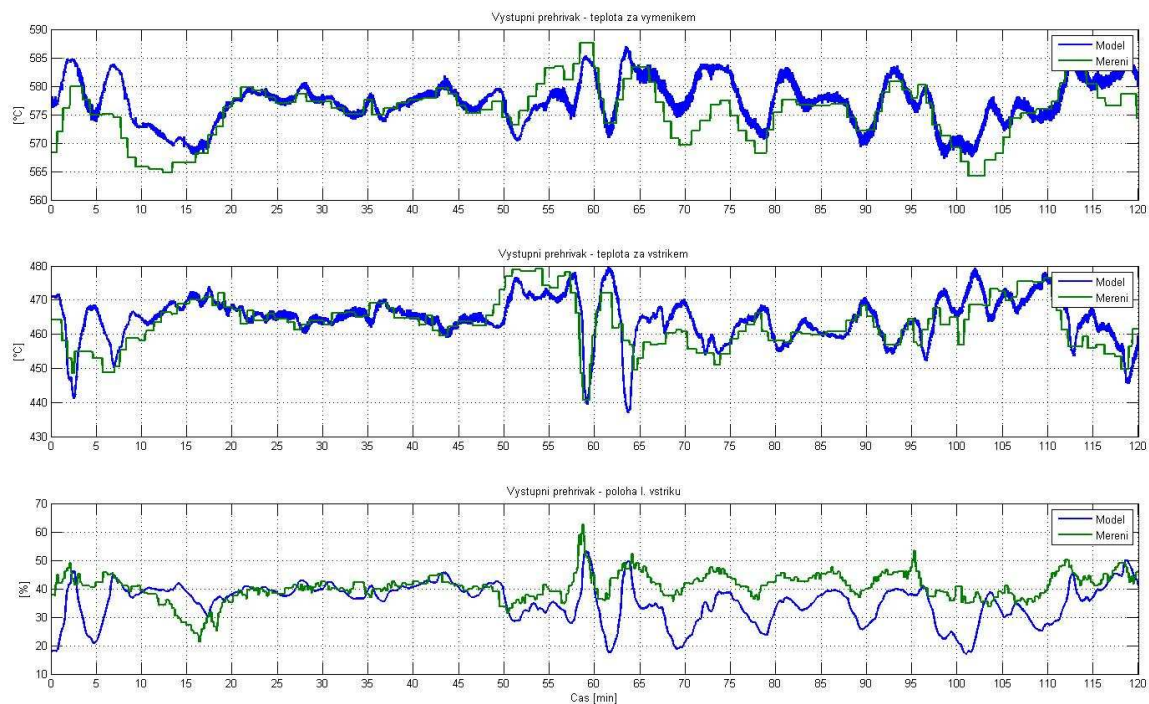
Příloha D – verifikace v úseku L



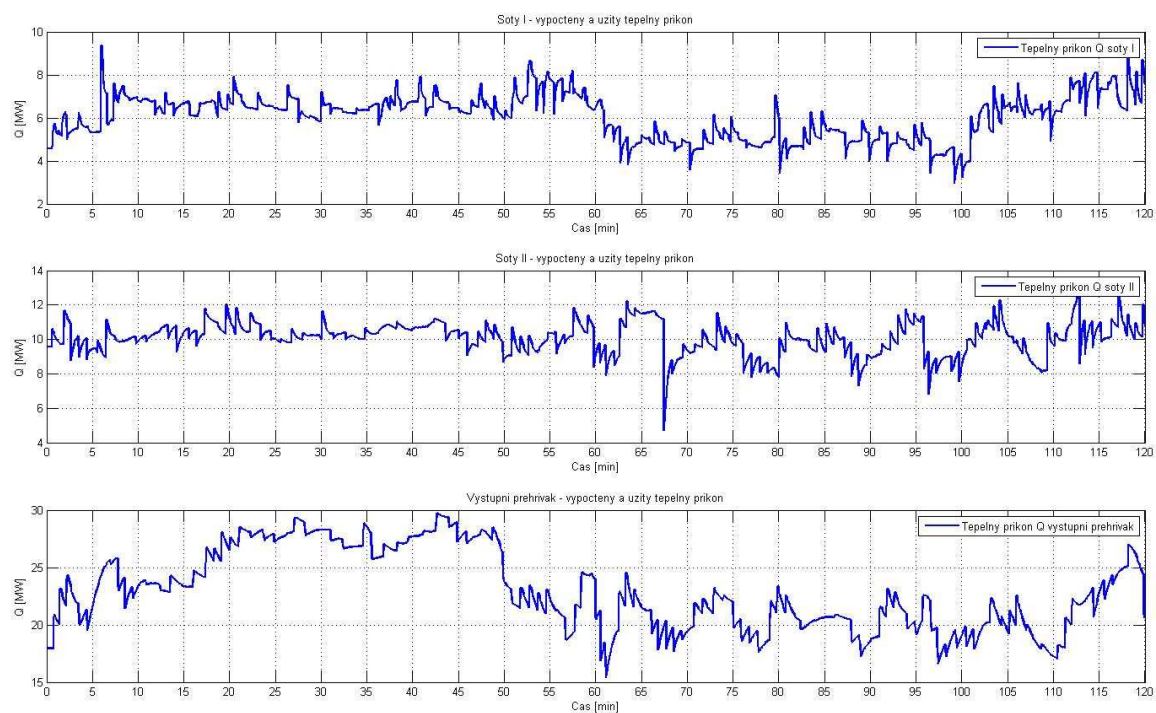
Obr. 7.16: Porovnání modelu a měření v úseku L (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



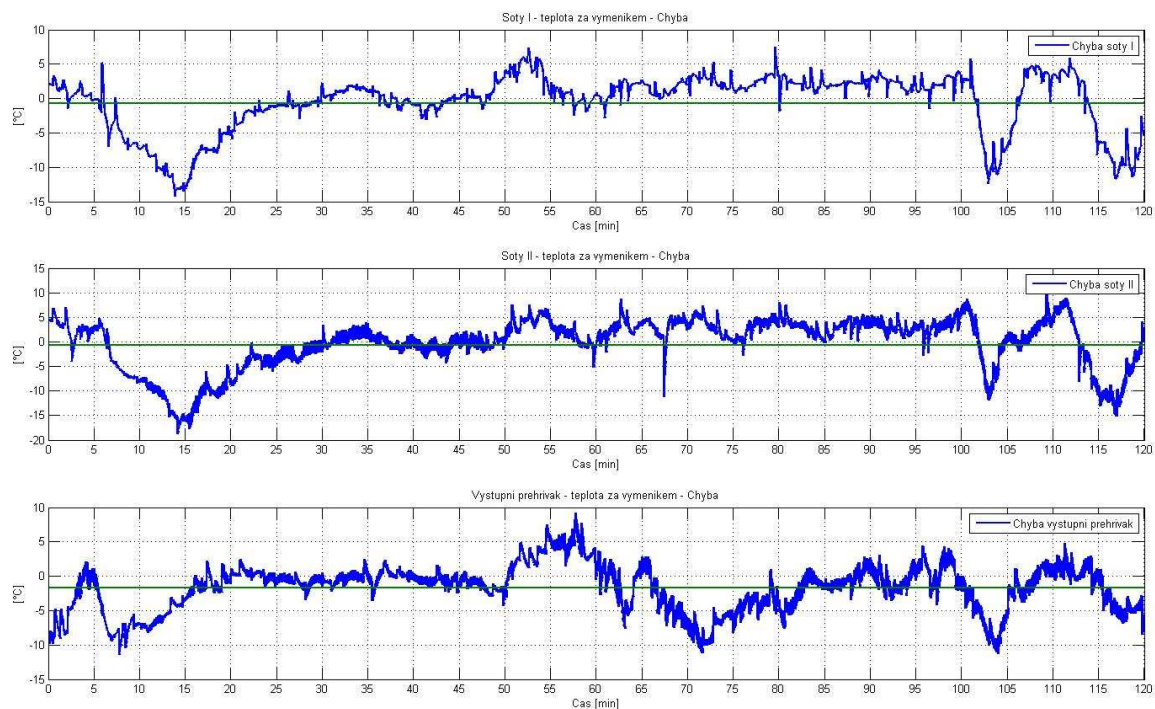
Obr. 7.17: Porovnání modelu a měření v úseku L (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.18: Porovnání modelu a měření v úseku L (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstříkem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstříkávání výstupního přehříváku)



Obr. 7.19: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku L s odhadem střední hodnoty

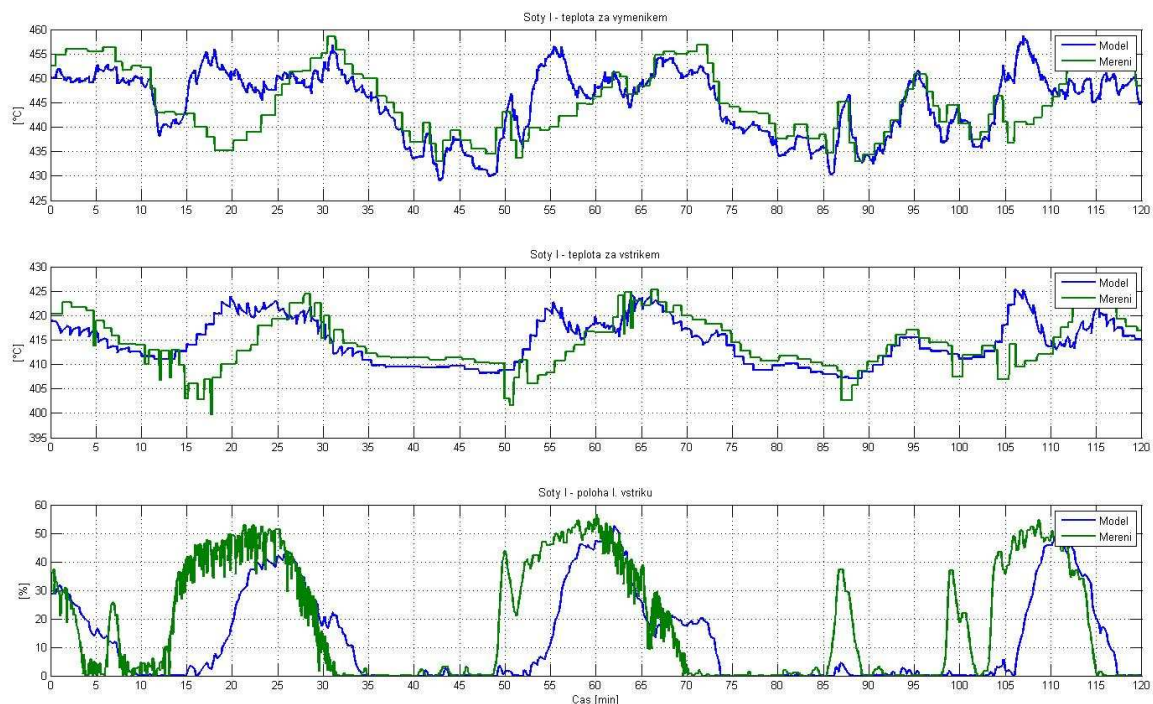


Obr. 7.20: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku L s odhadem střední hodnoty

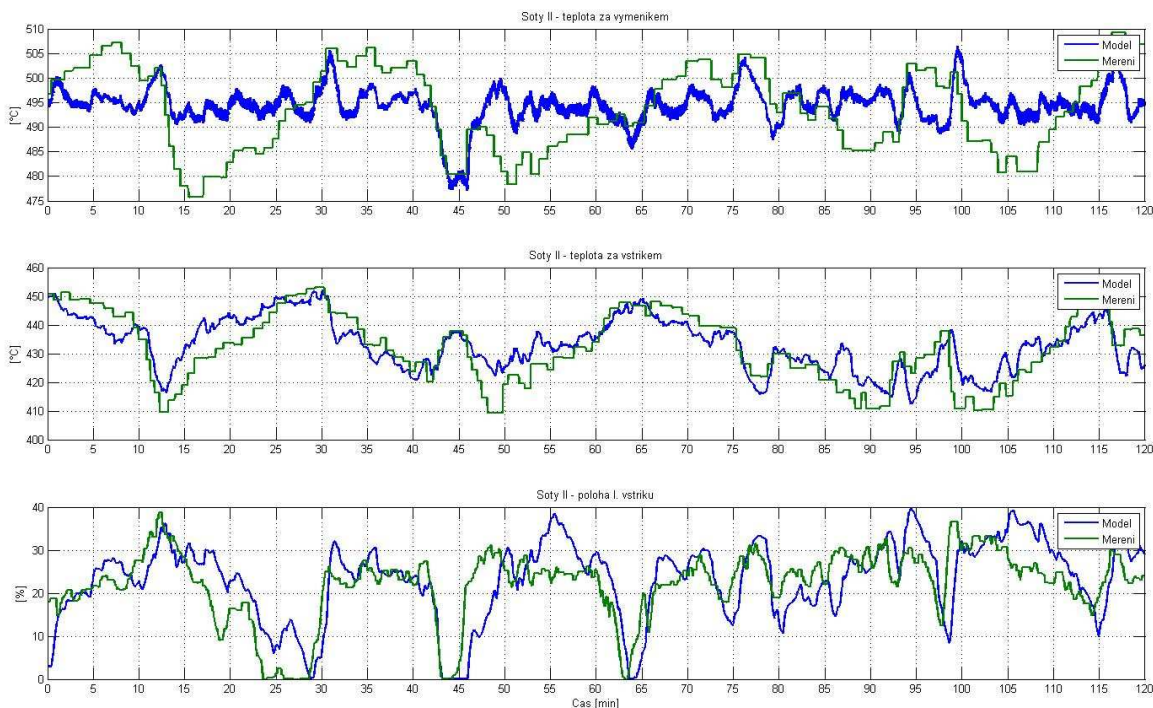
Tab. 7.4: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku L

	$J [^{\circ}C^2]$	$Q_{str} [MW]$	$T_{str} [^{\circ}C]$	$E_{str} [^{\circ}C]$	$E_{max} [^{\circ}C]$	$E_{min} [^{\circ}C]$	$E_{var} [^{\circ}C^2]$	$E_{std} [^{\circ}C]$
Šoty I	4,21E+05	6,129	445,050	-0,774	14,153	2,12E-05	18,006	4,243
Šoty II	6,27E+05	10,080	489,130	-0,657	18,664	4,07E-04	27,272	5,222
Výstupní přehřívák	3,10E+05	23,370	577,091	-1,660	11,415	8,61E-05	10,925	3,305

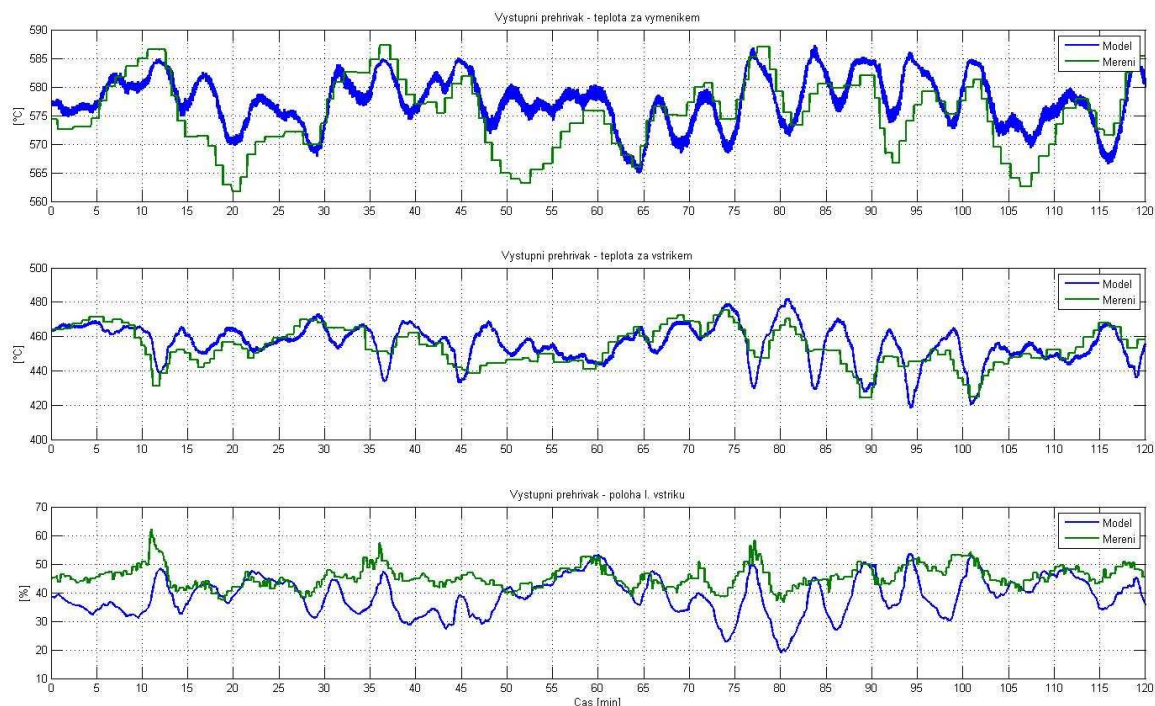
Příloha E – verifikace v úseku M



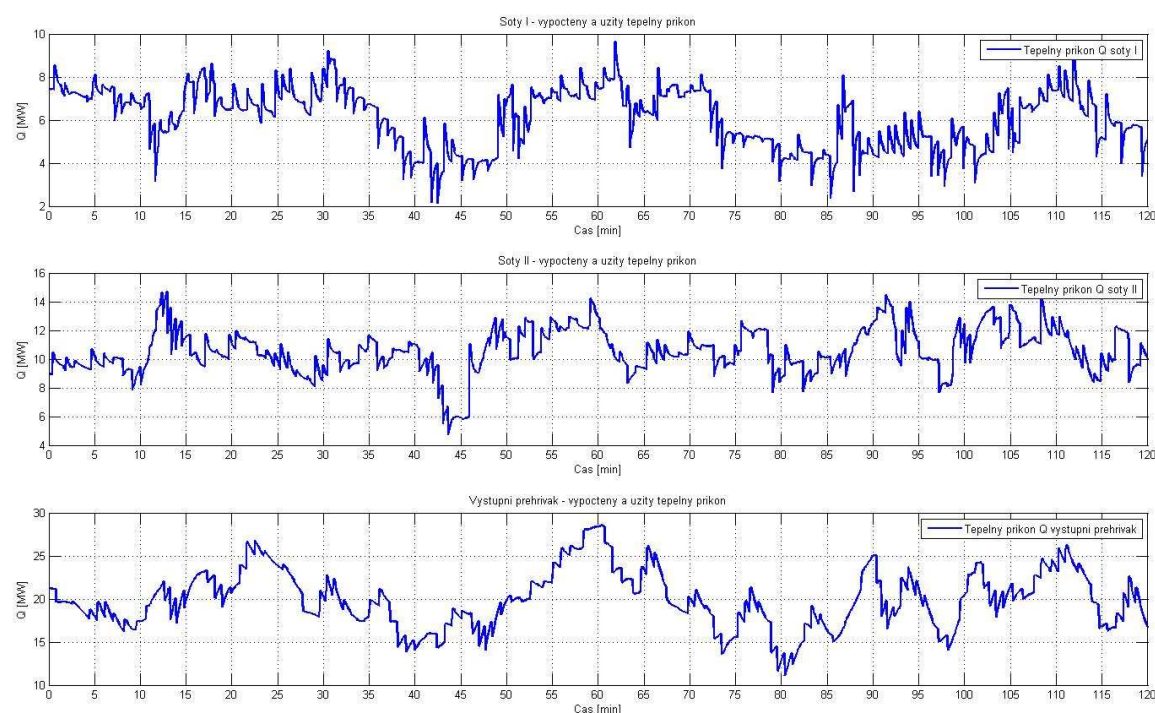
Obr. 7.21: Porovnání modelu a měření v úseku M (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



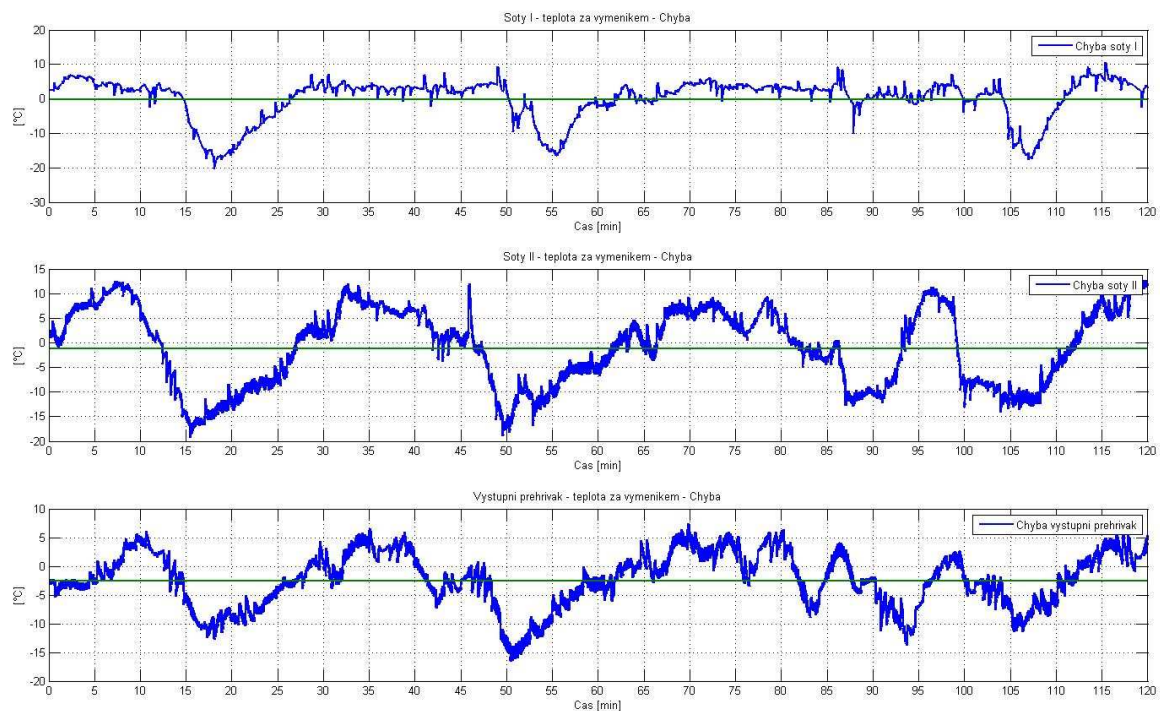
Obr. 7.22: Porovnání modelu a měření v úseku M (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.23: Porovnání modelu a měření v úseku M (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstříkem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstříkávání výstupního přehříváku)



Obr. 7.24: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku M s odhadem střední hodnoty

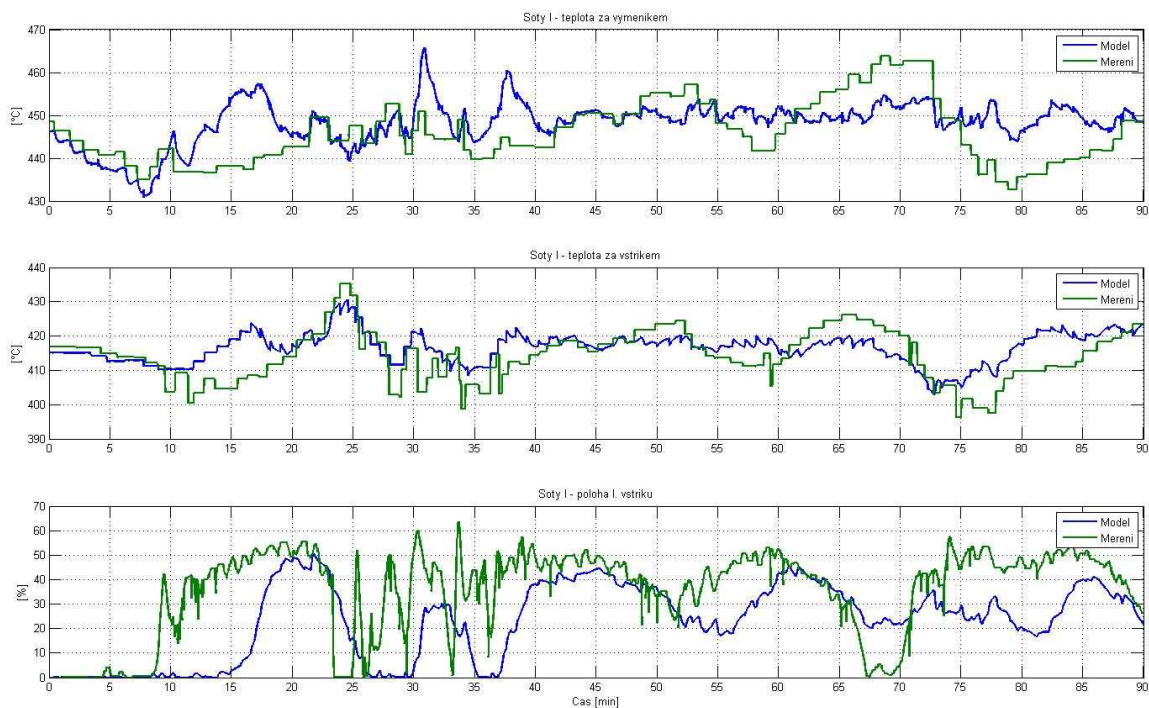


Obr. 7.25: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku M s odhadem střední hodnoty

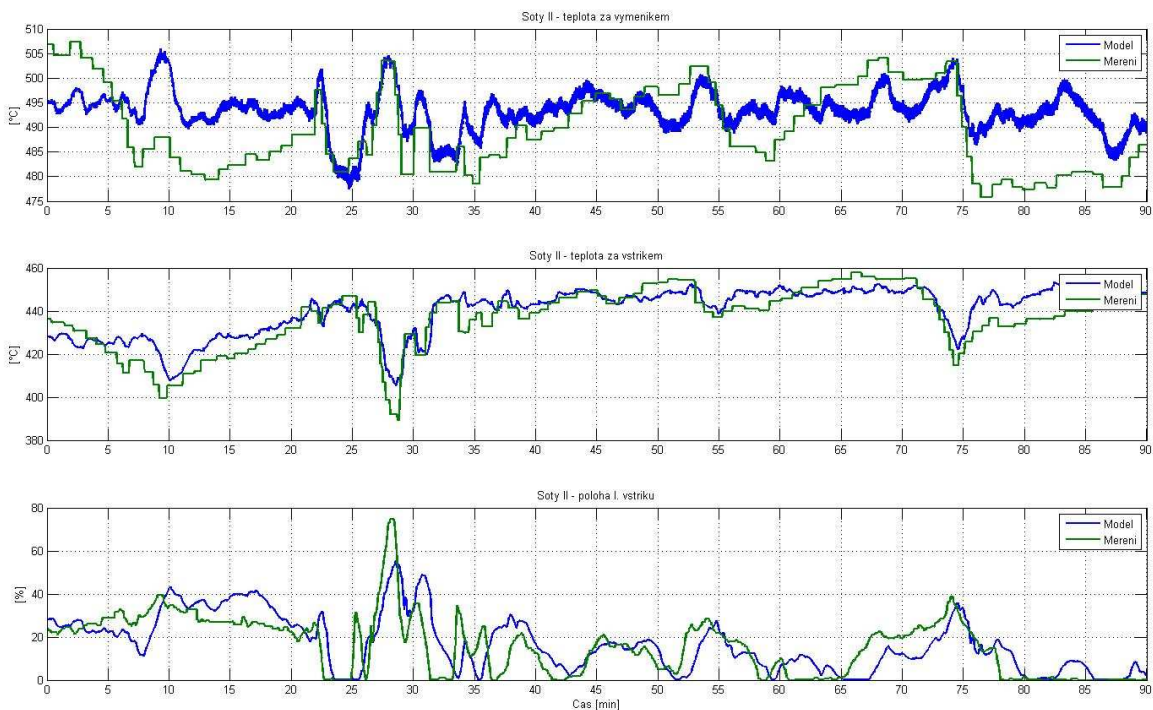
Tab. 7.5: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku M

	$J [^{\circ}\text{C}^2]$	$Q_{\text{str}} [\text{MW}]$	$T_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{str}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}^2]$	$E_{\text{std}} [^{\circ}\text{C}]$
Šoty I	6,97E+05	6,125	445,311	-0,279	20,403	2,01E-04	37,185	6,098
Šoty II	1,18E+06	10,568	494,425	-1,296	19,146	4,35E-05	61,563	7,846
Výstupní přehřívák	5,60E+05	20,063	577,274	-2,601	16,599	7,03E-04	23,156	4,812

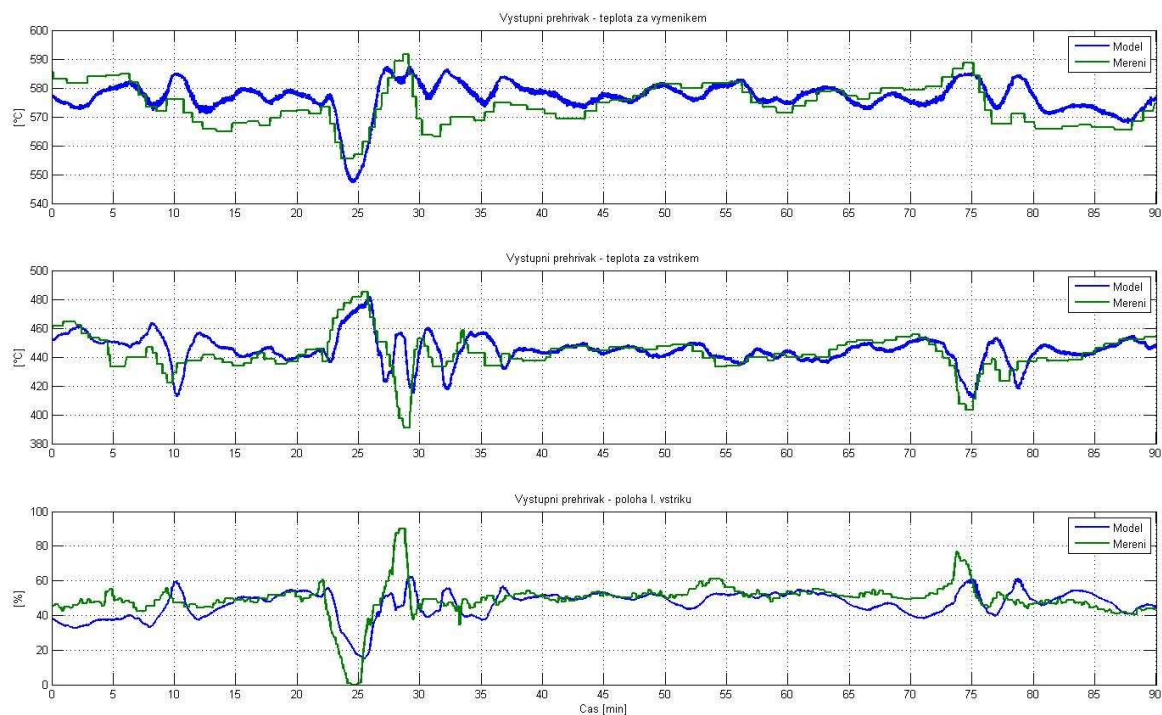
Příloha F – verifikace v úseku N



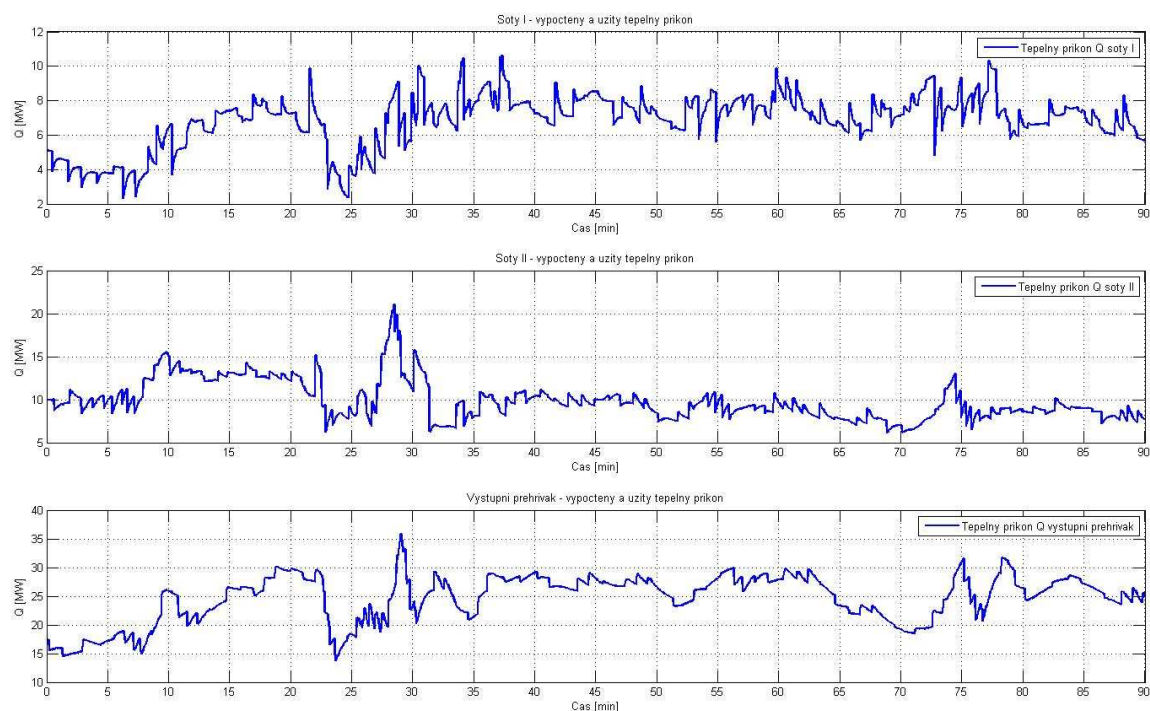
Obr. 7.26: Porovnání modelu a měření v úseku N (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



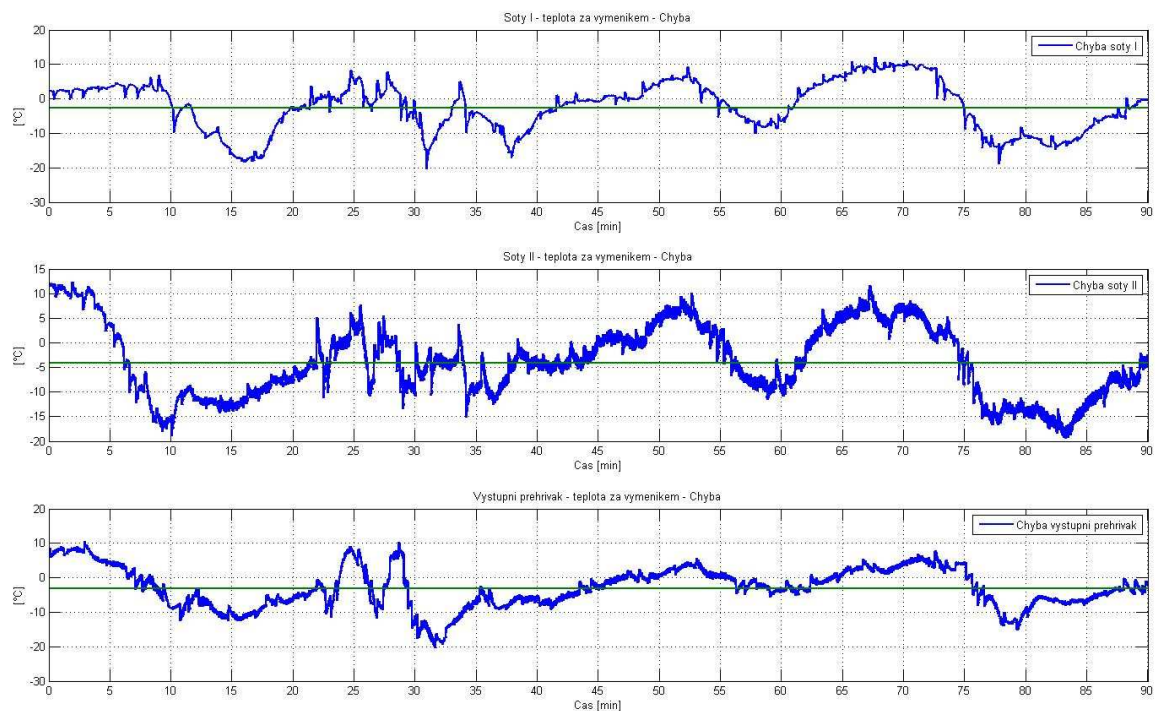
Obr. 7.27: Porovnání modelu a měření v úseku N (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstřikem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.28: Porovnání modelu a měření v úseku N (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 7.29: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku N s odhadem střední hodnoty

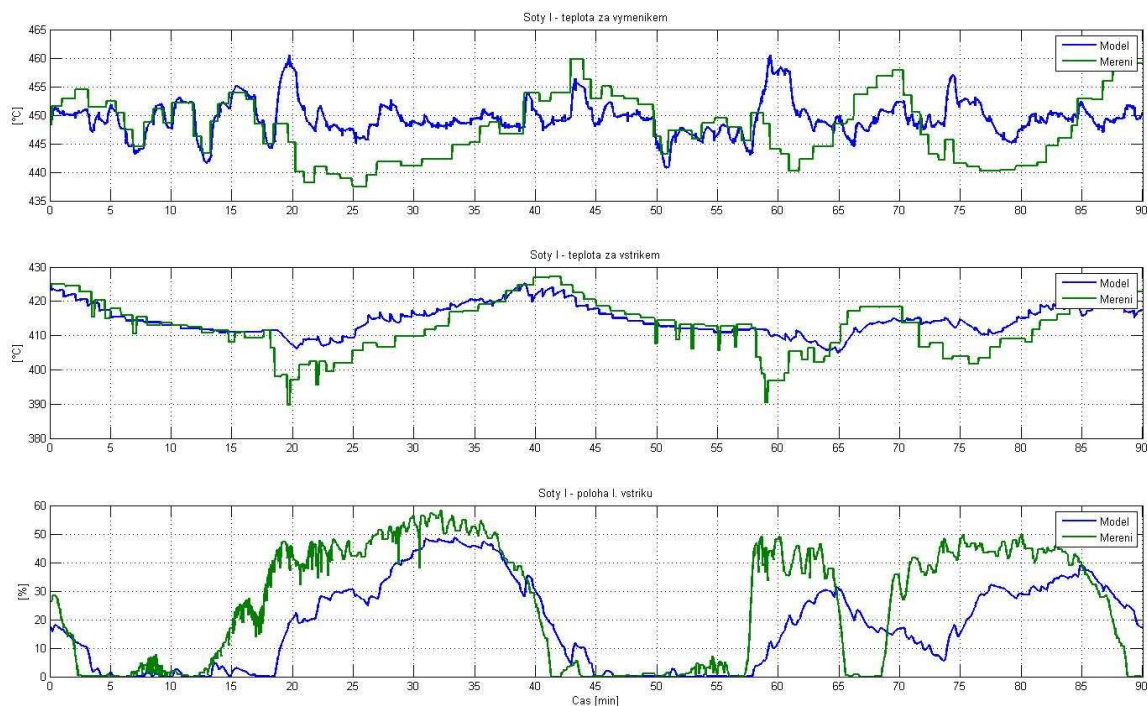


Obr. 7.30: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku N s odhadem střední hodnoty

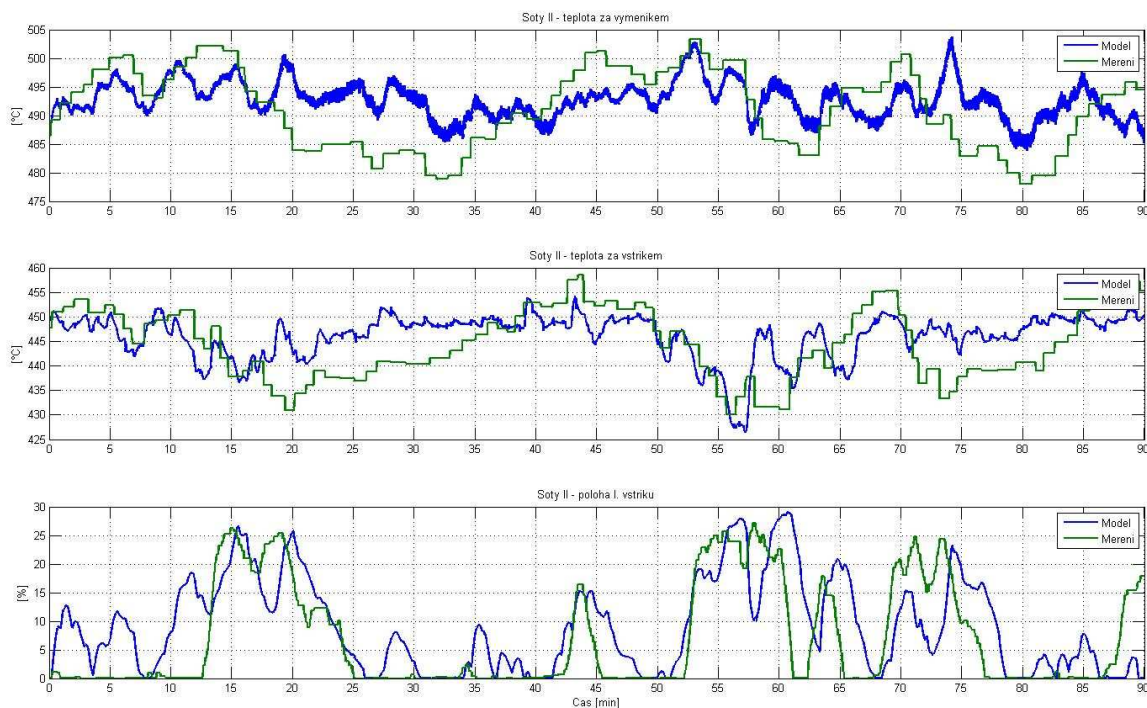
Tab. 7.6: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku N

	$J [^{\circ}C^2]$	$Q_{str} [MW]$	$T_{str} [^{\circ}C]$	$E_{str} [^{\circ}C]$	$E_{max} [^{\circ}C]$	$E_{min} [^{\circ}C]$	$E_{var} [^{\circ}C^2]$	$E_{std} [^{\circ}C]$
Šoty I	8,28E+05	6,849	448,250	-2,608	20,215	4,54E-04	49,343	7,025
Šoty II	1,02E+06	9,828	493,230	-4,153	19,363	8,68E-04	51,797	7,197
Výstupní přehřívák	6,25E+05	24,715	576,499	-3,059	20,221	4,61E-04	32,977	5,743

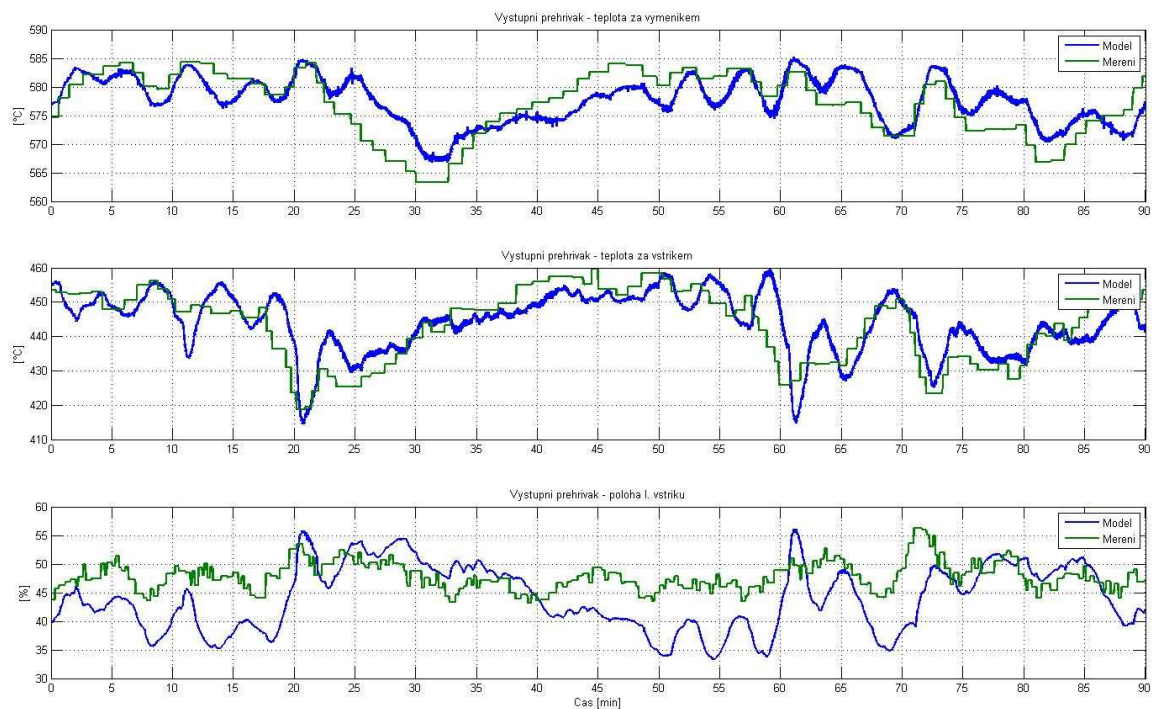
Příloha G – verifikace v úseku O



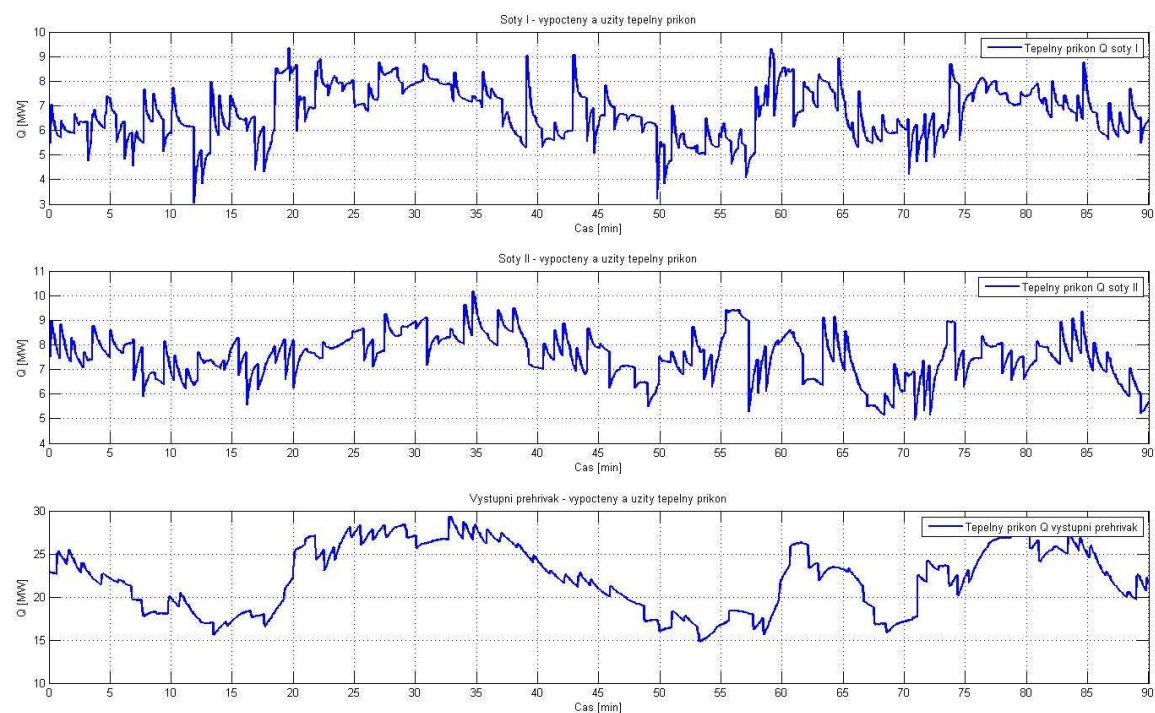
Obr. 7.31: Porovnání modelu a měření v úseku O (teplota páry za výměníkem šoty I, teplota páry za předřazeným vstříkem šoty I, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty I)



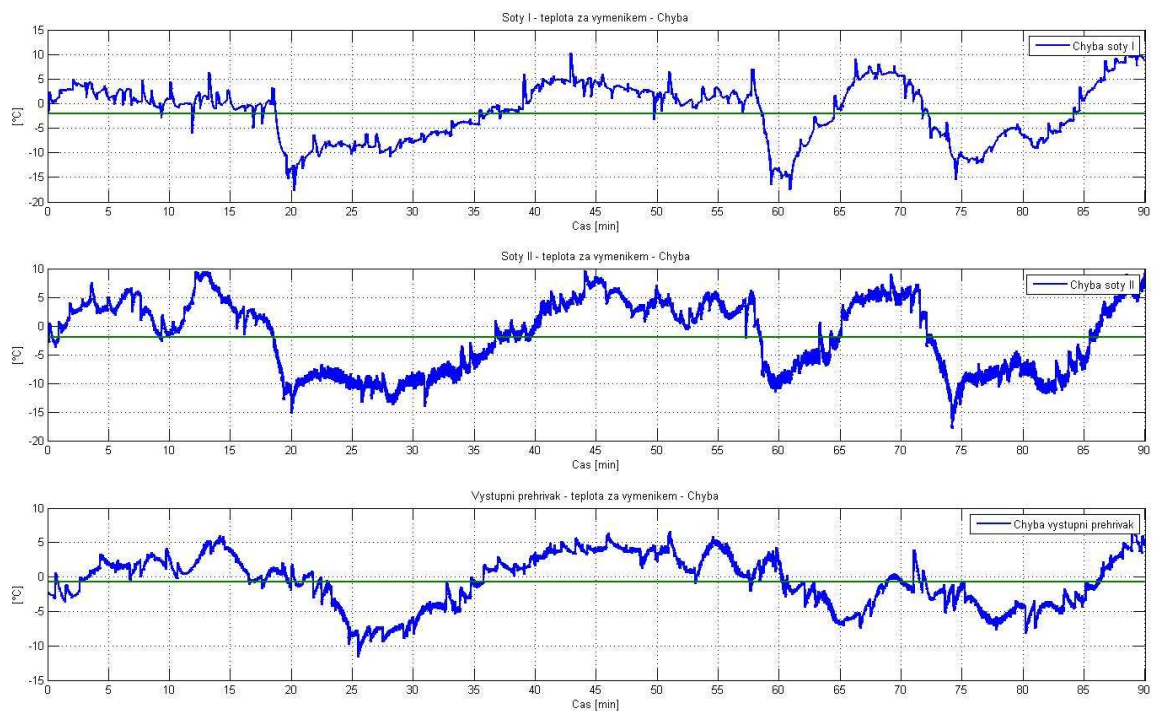
Obr. 7.32: Porovnání modelu a měření v úseku O (teplota páry za výměníkem šoty II, teplota páry za předřazeným vstříkem šoty II, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování šoty II)



Obr. 7.33: Porovnání modelu a měření v úseku O (teplota páry za výstupním přehřívákem, teplota páry za předřazeným vstřikem výstupního přehříváku, poloha regulačního ventilu předřazeného vstřikování výstupního přehříváku)



Obr. 7.34: Tepelný příkon do výměníku šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku O s odhadem střední hodnoty



Obr. 7.35: Chyba E modelu šoty I, šoty II a výstupního přehříváku v úseku O s odhadem střední hodnoty

Tab. 7.7: Kvantitativní vyjádření rozdílu mezi modelem a měřením v úseku O

	$J [^{\circ}C^2]$	$Q_{str} [MW]$	$T_{str} [^{\circ}C]$	$E_{str} [^{\circ}C]$	$E_{max} [^{\circ}C]$	$E_{min} [^{\circ}C]$	$E_{var} [^{\circ}C^2]$	$E_{std} [^{\circ}C]$
Šoty I	5,22E+05	6,742	449,497	-2,004	17,640	2,75E-04	33,374	5,777
Šoty II	6,00E+05	7,553	492,636	-2,053	17,911	2,26E-04	38,806	6,229
Výstupní přehřívák	2,08E+05	22,468	577,516	-0,781	11,588	8,42E-04	14,311	3,783

Příloha H – estimované parametry lineárních stochastických modelů

Estimované parametry ARMAX modelu ($A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)$):

$$A(q) = 1 - 1.861q^{-1} + 0.2662q^{-2} + 0.572q^{-3} + 0.298q^{-4} - 0.07722q^{-5} - 0.1833q^{-6} - 0.01425q^{-7}$$

$$B_1(q) = -0.4377q^{-6} + 0.7857q^{-7} + 0.002036q^{-8} - 0.3635q^{-9} - 0.2362q^{-10} + 0.2497q^{-11}$$

$$B_2(q) = -0.01751q^{-6} + 0.06762q^{-7} - 0.1167q^{-8} + 0.1154q^{-9} - 0.06388q^{-10} + 0.01499q^{-11}$$

$$B_3(q) = -1.1e-9q^{-6} + 3.2e-9q^{-7} - 3.62e-9q^{-8} + 1.9e-9q^{-9} + 2.5e-11q^{-10} - 4.3e-10q^{-11}$$

$$C(q) = 1 + 0.3056q^{-1} + 0.4295q^{-2} + 0.4705q^{-3} + 0.4397q^{-4}$$

Estimované parametry OE modelu ($y(t) = [B(q)/F(q)]u(t) + e(t)$):

$$B_1(q) = -0.7q^{-9} + 0.8q^{-10} + 0.5q^{-11} - 0.02q^{-12} - 0.8q^{-13} - 0.5q^{-14} - 0.1q^{-15} + 0.7q^{-16} + 0.6q^{-17} - 0.6q^{-18}$$

$$B_2(q) = 0.04q^{-9} - 0.03q^{-10} - 0.05q^{-11} - 0.004q^{-12} + 0.02q^{-13} + 0.03q^{-14} + 0.01q^{-15} - 0.01q^{-16} - 0.03q^{-17} + 0.01q^{-18}$$

$$B_3(q) = 2.06e-5q^{-9} - 6.257e-5q^{-10} + 7.1e-5q^{-11} - 3.863e-5q^{-12} + 1.3e-5q^{-13} + 8.2e-6q^{-14} - 4.1e-5q^{-15} + 4.7e-5q^{-16} - 2.2e-5q^{-17} + 3.3e-6q^{-18}$$

$$F_1(q) = 1 - 2.4q^{-1} + 1.2q^{-2} + 1.02q^{-3} - 0.4q^{-4} - 0.9q^{-5} - 0.04q^{-6} + 1.16q^{-7} - 0.56q^{-8}$$

$$F_2(q) = 1 - 1.4q^{-1} - 0.1q^{-2} + 0.5q^{-3} + 0.4q^{-4} - 0.01q^{-5} - 0.4q^{-6} - 0.3q^{-7} + 0.4q^{-8}$$

$$F_3(q) = 1 - 0.1q^{-1} - 0.1q^{-2} - 0.2q^{-3} - 0.2q^{-4} - 0.3q^{-5} - 0.1q^{-6} + 0.06q^{-7} + 0.18q^{-8}$$

Estimované parametry BJ modelu ($y(t) = [B(q)/F(q)]u(t) + [C(q)/D(q)]e(t)$):

$$B_1(q) = -0.2592q^{-2} + 0.2568q^{-3}$$

$$B_2(q) = -0.001631q^{-2} + 0.001631q^{-3}$$

$$B_3(q) = 5.715e-010q^{-2} - 1.938e-009q^{-3}$$

$$C(q) = 1 + 1.707q^{-1} + 0.9906q^{-2}$$

$$D(q) = 1 - 1.997q^{-1} + 0.9976q^{-2}$$

$$F_1(q) = 1 - 0.9957q^{-1}$$

$$F_2(q) = 1 - q^{-1}$$

$$F_3(q) = 1 - 0.999q^{-1}$$

$$F_1(q) = 1 - 0.8215q^{-1}$$

$$F_2(q) = 1 - 0.9538q^{-1}$$

$$F_3(q) = 1 - 0.8753q^{-1}$$

Příloha I – Přiložené CD

Přiložené CD obsahuje text diplomové práce v elektronické podobě ve formátu .pdf. Dále jsou zde umístěny všechny průběhy, tabulky, modely a zdrojové soubory m.file pro prostředí Matlab.